Numero 282
Febbraio 1992
Anno XXV
Volume XLVIII

LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

La cosmologia quantistica e l'origine dell'universo

Ricorrendo alla meccanica quantistica per determinare la funzione d'onda dell'universo nel suo insieme, si spera di far luce sul brevissimo istante iniziale nel quale ancora non esisteva lo spazio-tempo classico

di Jonathan J. Halliwell

È certo capitato a molti di noi di contemplare la volta stellata in una notte chiara e domandarsi «Da dove viene tutto questo?». Per molti secoli la risposta a questa domanda, a lungo meditata da filosofi e teologi, è rimasta al di fuori delle possibilità investigative della scienza. Solo in questo secolo la teoria si è sviluppata a un livello di raffinatezza e rigore sufficienti a permettere un'indagine fondata sui primissimi istanti di vita dell'universo. Utilizzando la teoria della relatività generale di Einstein per estrapolare le condizioni iniziali, si è dedotto che l'universo è scaturito da una regione incredibilmente piccola, densa e calda. Gli eventi che si sono susseguiti da allora, inclusa la formazione della materia e la sua aggregazione in galassie, stelle, pianeti ed elementi chimici, sembrano essere adeguatamente descritti dalla cosmologia convenzionale.

Le idee convenzionali sono però incomplete, dato che non riescono a spiegare, o quantomeno a descrivere, l'origine vera e propria dell'universo. Estrapolando indietro nel tempo, l'universo finisce per assumere dimensioni così ridotte che diventa necessario incorporare alla descrizione l'altro grande aspetto della fisica moderna: la teoria quantistica. Ma l'unificazione tra meccanica quantistica e relatività generale è stata descritta, nel migliore dei casi, come un matrimonio sotto la minaccia del fucile. La sua consumazione resta uno dei grandi problemi della fisica.

Negli ultimi decenni si sono cominciati a compiere progressi nell'applicazione della teoria quantistica alla descrizione dell'universo. Questi primi passi si sono rivelati abbastanza promettenti da incoraggiare coloro che li hanno intrapresi a coniare un nome per il loro tentativo: cosmologia quantistica. I ricercatori che operano in questo campo prendono le mosse da ricerche eseguite negli anni sessanta da Bryce S. DeWitt dell'Università del Texas ad Austin, Charles W. Misner dell'Università del Maryland e John A. Wheeler della Princeton University. Questi studi stabilirono le caratteristiche generali dell'applicazione della meccanica quantistica all'universo nel suo insieme, ma non vennero presi molto sul serio fino agli anni ottanta, quando le teorie cosmologiche classiche cominciarono a dimostrarsi inadeguate nei loro tentativi di spiegare in modo completo l'inizio dell'universo.

I principali studiosi che si sono dedicati a questa ricerca sono James B. Hartle dell'Università della California a Santa Barbara, Stephen W. Hawking dell'Università di Cambridge, Andrei D. Linde dell'Istituto di fisica Lebedev di Mosca e Alexander Vilenkin della Tufts University. Essi hanno proposto vincoli ben precisi alle condizioni iniziali, vale a dire condizioni che devono essere esistite nel primissimo istante di vita dell'universo. Con l'aggiunta di opportune leggi che regolino l'evoluzione dell'universo, queste proposte potrebbero ragionevolmente condurre a una spiegazione completa di tutte le osservazioni cosmologiche e risolverebbero perciò importanti problemi che minano le fondamenta della cosmologia convenzionale.

L'aspetto centrale dello scenario cosmologico convenzionale è il modello di universo detto del big bang caldo. Da quando fu proposta per la prima volta da George Gamow nel 1948, l'idea di una nascita esplosiva ha dovuto continuamente combattere contro altre teorie sull'origine dell'universo, e ha sempre vinto. Nei decenni trascorsi da allora il modello è stato perfezionato da altri. Utilizzando la relatività generale e alcune leggi fisiche fondamentali, il modello del big bang caldo nella sua forma attuale fa risalire la nascita dell'universo a circa 15 miliardi di anni fa, a partire da uno stato iniziale estremamente piccolo, caldo e denso. L'espansione successiva ha dato origine al grande e freddo universo che oggi osserviamo.

Il modello del big bang caldo fornisce previsioni precise riguardo all'universo attuale. Prevede la formazione dei nuclei e le abbondanze relative di certi elementi chimici, nonché l'esistenza e l'esatta temperatura della radiazione di fondo a microonde (un resto dell'esplosione iniziale che permea tutto l'universo). La previsione della radiazione cosmica di fondo, fatta da Ralph A. Alpher dello Union College e Robert Herman dell'Università del Texas ad Austin, fu confermata nel 1964 da Arno A. Penzias e Robert W. Wilson dei Bell Laboratories.

Nonostante i suoi successi, però, il modello del big bang caldo non riesce a spiegare molte delle caratteristiche dell'universo. Per esempio, l'universo attuale include regioni che in questo modello non possono essere state in comunicazione tra loro per la massima parte della sua storia. Queste regioni si stanno allontanando l'una dall'altra a una velocità tale da far ritenere che la distanza che le separa sia stata, per quasi tutta la storia dell'universo, superiore alla distanza-orizzonte (la distanza totale che un segnale luminoso avrebbe potuto percorrere dall'origine dell'universo). Questo «problema dell'orizzonte» rende difficile spiegare la stupefacente uniformità della radiazione cosmica di fondo.

C'è poi il «problema della curvatura nulla». Il modello del big bang caldo implica che la curvatura dell'universo si accentui progressivamente al passare del tempo, ma le osservazioni rivelano che la geometria della parte di universo che possiamo osservare è estremamente piatta. L'universo potrebbe presentare una simile piattezza solo se al suo inizio fosse già stato quasi esattamente piatto (entro una parte su 10^{60}), e molti cosmologi considerano profondamente innaturale una discrepanza tanto piccola.

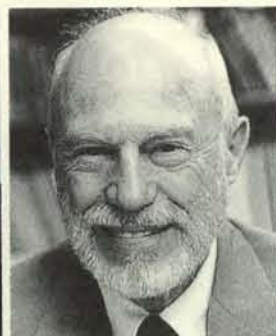
Forse ancor più grave è il fatto che il modello del big bang caldo non riesce a spiegare in modo adeguato l'origine delle strutture di grande scala, quali le galassie. Diversi ricercatori, in particolare Edward R. Harrison dell'Università del Massachusetts ad Amherst e Yakov B. Zel'dovich dell'Istituto per i problemi di fisica di Mosca, hanno proposto una par-

L'ammasso Abell 1060 contiene numerose galassie a spirale ed ellittiche. La formazione delle galassie è una delle caratteristiche dell'universo che la cosmologia classica non riesce a spiegare in modo convincente. La cosmologia quantistica potrebbe colmare queste lacune.

Alcuni fra i fondatori della cosmologia moderna

ERWIN SCHRÖDINGER (1887-1961), fisico austriaco, fu uno dei padri della meccanica quantistica. Basandosi sull'idea che la materia può avere comportamento sia ondulatorio sia particellare, determinò l'equazione fondamentale per la funzione d'onda dei sistemi atomici. Dotato di grande versatilità, studiò poi la filosofia e la letteratura delle culture occidentali e cercò di dimostrare come sia possibile impiegare la fisica quantistica per spiegare la struttura genetica.

GEORGE GAMOW (1904-1968) emigrò negli Stati Uniti dall'Unione Sovietica nel 1934. Prolifico cultore di molti campi della fisica, nel 1948 propose l'ipotesi del big bang nell'ambito di una teoria sull'origine degli elementi leggeri. Brillante, ma considerato eccentrico da alcuni colleghi, non fu mai preso molto sul serio.

RALPH A. ALPHER (n. 1921), pupillo di Gamow, ora allo Union College, e **ROBERT HERMAN** (n. 1914) dell'Università del Texas ad Austin ipotizzarono nel 1948 l'esistenza della radiazione cosmica di fondo mentre si trovavano alla Johns Hopkins University impegnati a sistematizzare le teorie di Gamow sulla nascita dell'universo e sull'origine degli elementi leggeri.

JOHN A. WHEELER (n. 1911), ora professore emerito alla Princeton University, ha dato importanti contributi a molte teorie della fisica moderna, dalla descrizione quantistica della fissione nucleare all'interpretazione delle stelle di neutroni e dei buchi neri. Studia anche le implicazioni filosofiche della meccanica quantistica.
BRYCE S. DEWITT (n. 1923) dell'Università del Texas ad Austin si è occupato in particolare dell'applicazione della teoria dei quanti all'universo e della teoria della gravità quantistica. Negli anni sessanta Wheeler e DeWitt hanno formulato insieme l'analogo cosmologico dell'equazione di Schrödinger.

HUGH EVERETT III (1930-1982), allievo di Wheeler negli anni cinquanta a Princeton, risolse il problema osservatore-osservato con la sua interpretazione «a molti mondi» che sviluppò inizialmente nella sua tesi di dottorato. In seguito divenne analista della difesa e contribuì alla teoria dei giochi e alla ricerca operativa.

STEPHEN W. HAWKING (n. 1942) ha contribuito alla dimostrazione che le singolarità sono conseguenze inevitabili della relatività generale di Einstein. È forse maggiormente conosciuto per la dimostrazione che i buchi neri non sono realmente tali, ma irradiano energia. Ha avuto un ruolo di primo piano nella rinascita della cosmologia quantistica negli anni ottanta, utilizzandola per capire che cosa accadde «prima» del big bang. Tiene la cattedra che fu di Newton all'Università di Cambridge.

ziale spiegazione, dimostrando come si possano formare strutture di grande scala a partire da piccole fluttuazioni della densità della materia in un universo primordiale altrimenti omogeneo. Ma l'origine ultima di queste fluttuazioni restava del tutto ignota ed esse dovevano essere assunte come condizioni iniziali.

Per farla breve, quindi, il problema del big bang caldo è la sua estrema dipendenza da condizioni iniziali ben precise. Ottenere l'universo attuale da questo modello sarebbe altrettanto improbabile che trovare una matita in equilibrio sulla punta subito dopo un terremoto.

Nel 1980 Alan H. Guth del Massachusetts Institute of Technology propose una convincente alternativa alla necessità di ipotizzare condizioni iniziali tanto speciali. Il suo modello, conosciuto con il nome di modello dell'universo inflazionario, è simile a quello del big bang caldo tranne che per un punto essenziale: lo schema di Guth per l'inizio dell'universo include un primo, brevissimo periodo di espansione straordinariamente rapida. Questo processo, chiamato inflazione, sarebbe durato per un tempo incredibilmente breve - circa 10^{-30} secondi - e in questo lasso di tempo le dimensioni dell'universo sarebbero aumentate di un altrettanto sorprendente fattore 10^{30}, passando dagli iniziali 10^{-28} centimetri a un metro circa (si veda l'articolo *L'universo inflazionario* di Alan H. Guth e Paul J. Steinhardt in «Le Scienze» n. 191, luglio 1984).

L'inflazione di Guth è essenzialmente una brevissima discontinuità all'interno del modello del big bang caldo, ma è sufficiente a risolvere molti dei problemi di cui abbiamo parlato. L'inflazione risolve il problema dell'orizzonte perché l'universo osservato deriverebbe da una regione abbastanza piccola da permettere in ogni momento la comunicazione tra tutte le sue parti. Il problema della curvatura nulla svanisce perché l'enorme espansione avrebbe gonfiato l'universo al punto da farlo apparire piatto (proprio come appare piatta ogni piccola porzione della superficie di un grande pallone riempito d'aria). Viene risolto anche il problema delle fluttuazioni di densità perché questo scenario prevede che la subitanea espansione avrebbe «congelato» alcune fluttuazioni quantistiche che sarebbero state il seme per la formazione di strutture di grande scala.

Ma per quale motivo sarebbe dovuta avvenire l'inflazione? Guth trovò una spiegazione plausibile in un particolare tipo di materia. Nel modello del big bang caldo la materia presente nell'universo è un plasma uniformemente distribuito oppure polvere. Il modello di Guth considera la materia come costituita da particelle associate a campi scalari. Queste particelle non rientrano certo nella vita quotidiana, ma compaiono in modo naturale in molte teorie; anzi si ritiene che costituiscano la forma di materia dominante in condizioni di altissima energia come quelle presenti all'inizio dell'universo. Secondo il modello inflazionario la loro presenza produce una sorta di pressione negativa; in queste condizioni la gravità diventa una forza repulsiva e si ha l'inflazione. Alla fine dell'era inflazionaria, il decadimento della materia associata a campi scalari riscalda fino ad altissime temperature l'universo inizialmente freddo. L'evoluzione successiva segue esattamente il cammino descritto dal modello del big bang caldo: l'universo si espande e si raffredda e il calore residuo viene rilevato come radiazione cosmica di fondo.

Come si è già detto l'aspetto forse più importante del modello inflazionario è che fornisce una possibile spiegazione per l'origine delle fluttuazioni di densità che avrebbero generato le galassie e altre strutture. Il modello di universo inflazionario ipotizza che il campo scalare sia nel suo insieme uniforme, ma possa tuttavia contenere piccole disomogeneità. Secondo la meccanica quantistica, il valore del campo in corrispondenza delle disomogeneità non può essere esattamente nullo, ma deve essere soggetto a piccole fluttuazioni quantistiche. (In effetti tutti i tipi di materia sottostanno a questi effetti quantistici, ma nella maggioranza dei casi le fluttuazioni sono tanto piccole da essere del tutto ininfluenti.) La rapida espansione dell'universo durante l'inflazione amplificò queste fluttuazioni inizialmente trascurabili, fino a trasformarle in differenze di densità macroscopiche. (L'espansione molto più lenta che si ha nel modello del big bang caldo è incapace di produrre quest'effetto.) Calcoli dettagliati hanno in effetti dimostrato che, dati certi assunti riguardo al campo scalare, le fluttuazioni di densità risultanti erano del tipo proposto da Harrison e Zel'dovich.

L'inflazione costituisce un sensazionale miglioramento del modello del big bang caldo, dato che permette di ricavare lo stato attuale dell'universo a partire da un insieme molto più ampio e decisamente più plausibile di condizioni iniziali. Nonostante ciò, neppure l'inflazione riesce a rendere le previsioni sull'attuale situazione dell'universo del tutto indipendenti da assunzioni sulle condizioni iniziali. In particolare l'inflazione stessa dipende da un certo numero di ipotesi: per esempio, sarebbe avvenuta solo se il campo scalare avesse avuto inizialmente una densità di energia grande e approssimativamente costante. Questa densità di energia approssimativamente costante equivale, almeno per un breve periodo, alla famosa (o famigerata) costante cosmologica di Einstein. Pertanto, che piaccia o no, il successo del modello inflazionario si basa anch'esso su determinate assunzioni riguardo alle condizioni iniziali.

Da dove hanno origine queste assunzioni? Ovviamente si può andare avanti a porsi una serie infinita di tali domande, come farebbe un bambino insopportabilmente curioso nella fase dei «perché?», ma il cosmologo che cerchi una spiegazione completa è infine spinto a chiedersi: «Che cosa accadde prima dell'inflazione? Come ebbe inizio veramente l'universo?».

Si può cominciare a rispondere a queste domande seguendo all'indietro nel tempo l'espansione dell'universo fino all'epoca che precedette l'inflazione; a questo punto le dimensioni dell'universo tendono a zero e sia l'intensità del campo gravitazionale sia la densità di energia della materia tendono all'infinito. L'universo sembra emergere, cioè, da una singolarità, una regione con curvatura e densità di energia infinite nella quale le leggi fisiche conosciute cessano di avere significato. Le singolarità non sono prodotti artificiali dei modelli, ma sono una conseguenza dei famosi «teoremi della singolarità» dimostrati negli anni sessanta da Hawking e Roger Penrose dell'Università di Oxford. Da questi teoremi si ricava che in condizioni ragionevoli ogni modello di universo in espansione estrapolato all'indietro nel tempo andrà incontro a una singolarità iniziale.

I teoremi non implicano, però, che la singolarità si presenti fisicamente, ma piuttosto che la teoria che li comprende, la relatività generale, cessi di valere in condizioni di estrema curvatura e debba essere sostituita da una teoria migliore, più ampia e potente. Qual è questa teoria? Una considerazione di scala ci fornisce un indizio. Nei pressi di una singolarità lo spazio-tempo diventa estremamente curvo e il suo volume si riduce a dimensioni molto piccole. In queste circostanze si deve fare appello alla teoria che si occupa del «molto piccolo», cioè la teoria quantistica.

La teoria quantistica è nata dal tentativo di spiegare fenomeni che si trovano oltre l'orizzonte della fisica classica convenzionale. Uno dei principali insuccessi della meccanica classica è la sua incapacità di descrivere la struttura atomica. Gli esperimenti indicavano che gli atomi sono costituiti da elettroni in orbita attorno a un nucleo, proprio come i pianeti orbitano attorno al Sole. Però tutti i tentativi per descrivere questo modello nell'ambito della fisica classica finivano per concludere che gli elettroni dovessero cadere sul nucleo: non c'era nulla che potesse mantenerli in orbita.

Per superare questo disaccordo tra osservazioni e teoria, all'inizio di questo secolo Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner K. Heisenberg e Paul A. M. Dirac, tra gli altri, svilupparono la meccanica quantistica. In questa formulazione il moto non è deterministico (come nella meccanica classica) bensì probabilistico. Le variabili dinamiche della meccanica classica, come la posizione e la quantità

di moto, non hanno in generale valori definiti nella meccanica quantistica, perché questa considera fondamentalmente ondulatoria la natura di qualsiasi sistema. Le informazioni probabilistiche riguardanti variabili come la posizione, la quantità di moto e l'energia sono racchiuse nella funzione d'onda del sistema, che si ricava risolvendo un'equazione chiamata equazione di Schrödinger.

La funzione d'onda nel caso di una particella puntiforme può essere vista come un campo oscillante distribuito su tutto lo spazio fisico. In ogni punto dello spazio questa funzione ha un'ampiezza e una lunghezza d'onda; il quadrato dell'ampiezza è proporzionale alla probabilità di trovare la particella in quel punto. Nel caso di funzioni d'onda di ampiezza costante, la lunghezza d'onda è legata alla quantità di moto della particella. Tuttavia, poiché le grandezze osservabili, posizione e quantità di moto, sono reciprocamente incompatibili, nel senso che se si misura con maggiore precisione la posizione aumenta proporzionalmente l'incertezza sulla quantità di moto, esiste sempre un certo grado di indeterminazione in entrambe le grandezze. Questo stato di cose, espresso dal principio di indeterminazione di Heisenberg, è una conseguenza elementare della natura ondulatoria delle particelle.

Il principio di indeterminazione porta a fenomeni qualitativamente diversi da quelli presenti in meccanica classica. In meccanica quantistica un sistema non può mai avere un'energia esattamente uguale a zero. L'energia totale è generalmente la somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale; l'energia cinetica dipende dalla quantità di moto, mentre l'energia potenziale dipende dalla posizione (una palla sulla cima di un colle ha più energia potenziale gravitazionale di una che si trova in fondo a un pozzo). Poiché il principio di indeterminazione impedisce di assegnare simultaneamente un valore definito a posizione e quantità di moto, l'energia cinetica e quella potenziale non possono essere entrambe nulle.

Il sistema possiede invece uno stato fondamentale in cui l'energia è la più bassa possibile. (Si ricordi che nello scenario inflazionario le galassie si formano da «fluttuazioni dello stato fondamentale».) È questo a impedire agli elettroni di precipitare sul nucleo: gli elettroni hanno un'orbita di minima energia da cui non possono cadere sul nucleo senza violare il principio di indeterminazione.

L'indeterminazione conduce anche a un fenomeno detto «effetto tunnel». In meccanica classica una particella dotata di una determinata energia non può attraversare una barriera energetica: una palla ferma in una scodella non sarà mai capace di uscirne. In meccanica quantistica la posizione non è definita univocamente, ma è invece distribuita su un intervallo (generalmente di ampiezza infinita). Ne consegue che esiste una probabilità definita che la particella possa trovarsi dall'altro lato della barriera. Si dice che la particella può «scavarsi un tunnel» attraverso la barriera.

Non si deve pensare all'effetto tunnel come a un processo che avvenga in un tempo reale. In un senso matematico ben preciso è opportuno pensare che la particella attraversi la barriera in un tempo «immaginario», cioè un tempo moltiplicato per la radice quadrata di −1. (In questo contesto la parola tempo perde il suo significato usuale e rappresenta in effetti una dimensione spaziale più che un tempo reale.)

Questi effetti specificamente quantistici non contraddicono la meccanica classica. Al contrario, la meccanica quantistica è una teoria più ampia e sostituisce la meccanica classica come descrizione corretta della natura. A scala macroscopica la natura ondulatoria delle particelle risulta del tutto indistinguibile, cosicché la meccanica quantistica riproduce i risultati della meccanica classica con estrema precisione (sebbene le modalità di questa transizione dalla rappresentazione quantistica a quella classica siano ancora argomento di ricerca).

Come è possibile utilizzare questi risultati per far luce su problemi cosmologici? Come la meccanica quantistica, anche la cosmologia quantistica cerca di descrivere un sistema in termini della sua funzione d'onda. Si può trovare la funzione d'onda dell'universo risolvendo la cosiddetta equazione di Wheeler-DeWitt, che è l'analogo cosmologico dell'equazione di Schrödinger. Nel caso più semplice la grandezza dell'universo è l'analogo della posizione e la sua velocità di espansione corrisponde alla quantità di moto.

Nella cosmologia quantistica, però, si presentano difficoltà tecniche e concettuali ben superiori a quelle che si incontrano nella meccanica quantistica. L'impedimento più grave è costituito dalla mancanza di una teoria quantistica della gravità completa e utilizzabile. Tre delle quattro forze fondamentali della natura (elettromagnetismo, forza nucleare forte e forza nucleare debole) sono state rese compatibili con la meccanica quantistica, ma tutti i tentativi di quantizzare la relatività generale di Einstein sono andati incontro al fallimento. Questo insuccesso ha una portata enorme: bisogna ricordare che la relatività generale - la migliore teoria della gravità di cui disponiamo - afferma che in una singolarità lo spazio diventa infinitamente piccolo e la densità di energia infinitamente grande. Per poter andare oltre, occorre una teoria quantistica della gravità.

Si deve menzionare il fatto che i sostenitori della teoria delle «supercorde» affermano che essa è una teoria quantistica coerente e unificata di tutte e quattro le forze della natura e pertanto è, o almeno contiene, una descrizione quantistica della gravità. Non si è ancora giunto un giudizio definitivo sulla teoria delle supercorde, ma in ogni caso essa è ben lontana dall'essere una teoria maneggevole, che possa risultare direttamente utile in cosmologia.

Un altro problema è quello dell'applicabilità della meccanica quantistica all'universo nel suo insieme. Questa teoria fu sviluppata per descrivere fenomeni a scala atomica: il suo perfetto accordo con i risultati sperimentali è uno dei più grandi trionfi della fisica moderna e nessuno che lavori in questo campo può onestamente nutrire dubbi riguardo alla sua correttezza a scala atomica. Alcuni però leverebbero voci di dissenso se si affermasse che la meccanica quantistica è ugualmente applicabile, per esempio, a tavoli e sedie.

Non è facile respingere questo attacco perché a scala macroscopica le previsioni della meccanica quantistica coincidono in tutto e per tutto con quelle della meccanica classica. È estremamente difficile rivelare sperimentalmente autentici effetti quantistici macroscopici. Oggetto di contenzioso ancora maggiore è quella che appare come una estrapolazione stravagante, e cioè che la meccanica quantistica si applichi in ogni istante all'intero universo e a tutto ciò che esso contiene. Che sia accettabile o meno, questa è l'affermazione fondamentale della cosmologia quantistica.

Un ulteriore, e forse più difficile, problema riguarda l'interpretazione della meccanica quantistica applicata alla cosmologia. Durante lo sviluppo della meccanica quantistica (applicata agli atomi) si rivelò necessario comprendere il modo in cui le basi matematiche della teoria si traducano in ciò che si osserverebbe realmente in una misurazione. Fu Bohr, negli anni venti e trenta, a porre le fondamenta di questa teoria quantistica delle misurazioni ipotizzando che il mondo possa essere diviso in due parti: i sistemi microscopici (quali gli atomi), retti solamente dalla meccanica quantistica, e i sistemi macroscopici esterni (come gli osservatori e i loro strumenti), che sono sotto il controllo della meccanica classica. Una misurazione è un'interazione tra l'osservatore e il sistema microscopico e conduce a una registrazione permanente dell'evento.

Durante questa interazione la funzione d'onda che descrive il sistema microscopico è sottoposta a una variazione discontinua dal suo stato iniziale a uno stato finale. La grandezza che deve essere misurata assume un valore preciso nello stato finale. Questa variazione discontinua viene indicata, in modo piuttosto altisonante, come collasso della funzione d'onda. Per esempio, la funzione d'onda potrebbe partire da uno stato in cui è ben definita la quantità di moto, ma se venisse misurata la posizione «collasserebbe» a uno stato in cui è quest'ultima a essere definita.

Sebbene molti teorici ritengano questa concezione, che potremmo chiamare «interpretazione di Copenaghen» della meccanica quantistica, insoddisfacente dal punto di vista filosofico, essa consente, nonostante tutto, di ottenere dalla teoria previsioni sperimentalmente verificabili e in accordo con quanto si osserva. È forse per questo che l'interpretazione di Copenaghen non ha subito grossi attacchi per quasi mezzo secolo.

Nel tentativo di applicare la meccanica quantistica all'intero universo ci si imbatte, comunque, in aspre difficoltà che non possono essere messe da parte come sottigliezze filosofiche. In una teoria dell'universo, della quale l'osservatore è una parte, non ci dovrebbe essere alcuna sostanziale separazione tra osservatore e oggetto osservato. Inoltre molti ricercatori provano disagio al pensiero che la funzione d'onda dell'intero universo collassi quando venga fatta un'osservazione. Vi è anche il problema delle previsioni probabilistiche: di solito si sottopongono a verifica tali previsioni eseguendo un gran numero di misurazioni (per esempio il lancio ripetuto di una moneta dimostra che la probabilità che esca testa è uguale a 1/2); in cosmologia vi è un solo sistema, che viene sottoposto a misurazione una sola volta.

Tenendo in debito conto queste difficoltà, Hugh Everett III della Princeton University, uno dei primi fisici a prendere sul serio l'idea di applicare la meccanica quantistica all'universo nel suo insieme, propose uno schema di interpretazione della meccanica quantistica particolarmente adatto alle specifiche esigenze della cosmologia. Diversamente da Bohr, Everett asserì che esiste una funzione d'onda universale che descrive sia l'osservatore macroscopico sia il sistema microscopico, senza alcuna fondamentale separazione tra i due. Una misurazione è semplicemente un'interazione tra parti diverse dell'intero universo e la funzione d'onda dovrebbe consentire di prevedere ciò che una parte «vede» quando ne osserva un'altra.

Così nella rappresentazione di Everett non c'è collasso della funzione d'onda, ma solo un'evoluzione continua descritta dall'equazione di Schrödinger per l'intero sistema. Ma, nel costruire un modello del processo di misurazione, Everett fece una scoperta veramente notevole: la misurazione sembra far sì che l'universo si suddivida in un numero di copie di se stesso sufficienti a tener conto di tutti i possibili risultati.

I teorici hanno discusso accanitamente la realtà delle molteplici copie di universo nell'interpretazione «a molti mondi» di Everett. In realtà le versioni moderne dell'idea di Everett, in particolare quelle formulate da Murray Gell-Mann del California Institute of Technology e da Hartle, danno meno risalto all'aspetto «a molti mondi» della teoria e parlano invece di «storie differenziate», ossia di storie possibili per l'universo alle quali possono essere assegnate certe probabilità. Dal punto di vista pratico non ha importanza se si pensa che tutte o una soltanto si realizzino nella realtà. Queste versioni hanno anche il merito di eliminare il ruolo dell'osservatore e la necessità del collasso della funzione d'onda e, a dispetto delle controversie, forniscono un quadro teorico entro cui lavorare.

Gell-Mann e Hartle affrontano anche la questione delle previsioni probabilistiche sull'intero universo e sostengono che le sole probabilità che hanno senso in cosmologia quantistica sono quelle a priori. Si tratta di probabilità vicine ai valori uno o zero, corrispondenti cioè a previsioni del tipo «sì/no». Sebbene gran parte delle previsioni probabilistiche non sia di questo tipo, è possibile ricondurle a esso modificando opportunamente le domande che il ricercatore si pone. Diversamente dalla meccanica quantistica, il cui scopo è determinare la probabilità di ogni possibile risultato di una data osservazione, la cosmologia quantistica cerca di determinare quali siano le osservazioni per cui la teoria prevede valori della probabilità vicini a zero o a uno.

Questo tipo di approccio ha portato alla comprensione dei seguenti concetti: in certi punti dello spazio e del tempo, tipicamente (ma non sempre) quando l'universo ha grandi dimensioni, la sua funzione d'onda indica che esso segue la meccanica classica con un grado di approssimazione eccellente. Lo spazio-tempo classico è perciò una previsione della teoria. Inoltre, in queste condizioni, la funzione d'onda fornisce probabilità per l'insieme dei possibili comportamenti classici dell'universo.

D'altro canto esistono alcune regioni, come quelle vicine alle singolarità classiche, in cui non è possibile fare alcuna previsione di questo tipo e le nozioni di spazio e tempo semplicemente non esistono. C'è solo una «nebulosità quantistica» ancora descrivibile dalle leggi note della fisica quantistica, ma non dalle leggi classiche. Così, nella cosmologia

Il principio di indeterminazione impedisce di definire simultaneamente l'esatta posizione e quantità di moto di una particella. La funzione d'onda di una particella in uno stato di posizione definita ha un picco netto in corrispondenza di un punto dello spazio, ma l'incertezza sulla quantità di moto è molto grande (*a*). La funzione d'onda per uno stato di quantità di moto determinata ha una lunghezza d'onda specifica e un'ampiezza costante in tutto lo spazio, ma la posizione della particella è del tutto indefinita (*b*). Uno stato «coerente» rappresenta un compromesso (*c*): l'indeterminazione esiste sia nella posizione sia nella quantità di moto, ma è la più piccola possibile compatibilmente con il principio di indeterminazione.

quantistica, non ci si preoccupa più di cercare di imporre condizioni iniziali di tipo classico in una regione in cui la fisica classica non è valida, come accade nei pressi della singolarità iniziale.

La funzione d'onda dell'universo descritta dalla cosmologia quantistica non elimina però la necessità di assunzioni sulle condizioni iniziali, e il problema delle condizioni iniziali classiche (le assunzioni del modello inflazionario e di quello del big bang caldo) si trasforma in un problema di condizioni iniziali quantistiche: in che modo viene selezionata una delle molte funzioni d'onda possibili (le molte soluzioni dell'equazione di Wheeler-DeWitt)?

Si comprende meglio questo problema confrontando la situazione cosmologica con quella di laboratorio, che è la condizione in cui si esamina la maggior parte dei problemi scientifici. In laboratorio un sistema possiede confini spaziali e temporali chiaramente definiti: la durata dell'esperimento, per esempio, o le dimensioni del contenitore. Entro questi confini è possibile controllare, o almeno osservare, lo stato fisico del sistema e, utilizzando le opportune leggi della fisica, determinare come le condizioni al contorno o iniziali evolvono nello spazio e nel tempo.

In cosmologia il sistema in esame è l'universo intero. Per definizione esso non ha parti esterne, nessun mondo al di fuori, nessun «resto dell'universo» a cui riferirsi per definire condizioni al contorno. Inoltre sembra piuttosto inverosimile che la semplice coerenza matematica possa condurre a un'unica soluzione dell'equazione di Wheeler-DeWitt, come affermò una volta lo stesso DeWitt. Perciò, allo stesso modo in cui i fisici teorici propongono leggi che regolano l'evoluzione dei sistemi fisici, il compito inevitabile del cosmologo quantistico è di proporre leggi per le condizioni iniziali o al contorno dell'universo. In particolare, Hartle e Hawking, Linde e Vilenkin hanno avanzato proposte ben precise intese a individuare una particolare soluzione dell'equazione di Wheeler-DeWitt, vale a dire una particolare funzione d'onda dell'universo.

La proposta di Hartle e Hawking definisce una particolare funzione d'onda dell'universo servendosi di una formulazione particolarmente elegante della meccanica quantistica, sviluppata originariamente negli anni quaranta dal compianto Richard P. Feynman del Caltech. Questa formulazione è chiamata metodo dell'integrale di percorso o della somma delle storie. Nella normale meccanica quantistica il calcolo della funzione d'onda comporta l'effettuazione di una certa somma su un insieme di storie del sistema; le storie terminano nel punto dello spazio e del tempo in cui si vuole conoscere il valore della funzione d'onda. Per rendere unica la funzione d'onda si specifica con precisione l'insieme di storie su cui fare la somma, insieme che comprende non solo le storie classiche, ma tutte quelle possibili per il sistema.

Sommare le storie è matematicamente equivalente a risolvere l'equazione di Schrödinger, ma fornisce una prospettiva della meccanica quantistica molto diversa la quale si è rivelata estremamente utile sia tecnicamente sia concettualmente. In particolare il metodo della somma delle storie è facilmente generalizzabile alla cosmologia quantistica. La funzione d'onda dell'universo può essere calcolata effettuando la somma su alcuni insiemi di storie dell'universo; questa tecnica equivale a risolvere l'equazione di Wheeler-DeWitt, come è stato dimostrato in generale da Hartle e da me in un recente articolo, e la particolare soluzione ottenuta dipende da come si sceglie l'insieme di storie da sommare.

Un modo per capire la scelta fatta da Hartle e Hawking è di tradurre la loro descrizione matematica in una geometrica. Immaginiamo l'estensione spaziale dell'universo in un particolare istante come un anello di corda che giaccia nel piano orizzontale. Se l'asse verticale rappresenta il tempo, allora l'anello cambia le proprie dimensioni al passare del tempo (il che corrisponde all'espansione e alla contrazione dell'universo). Le diverse storie possibili dell'universo appaiono perciò come tubi generati dall'evoluzione temporale dell'anello. Il bordo in fondo rappresenta l'universo attuale; l'estremità è lo stato iniziale (cioè l'origine dell'universo) che va specificato proponendo le condizioni iniziali. Alcuni tubi possono chiudersi a punta come un cono, altri possono semplicemente interrompersi in modo brusco.

Hartle e Hawking proposero di considerare solo i tubi in cui la parte iniziale si restringa fino a zero in modo uniforme e regolare formando una sorta di calotta emisferica. Si sommano, perciò, configurazioni geometriche che non hanno bordi (tranne che per il lato terminale, che è aperto e corrisponde all'universo attuale). Per questo motivo l'ipotesi di Hartle e Hawking è chiamata proposta di universo senza bordi.

Nella teoria classica è impossibile ottenere una configurazione geometrica chiusa così regolare: i teoremi della singolarità implicano che le storie classiche dell'universo debbano annullarsi in una singolarità, come la punta di un cono si

L'evoluzione dell'universo può essere rappresentata da «tubi» di spazio-tempo. Nelle teorie classiche ogni modello ragionevole di universo, quando viene fatto evolvere all'indietro nel tempo, finisce per incontrare una singolarità (*a*). Nella cosmologia quantistica lo stato iniziale dell'universo non è necessariamente un punto (*b*). Secondo alcune ipotesi specifiche, l'universo avrebbe avuto inizio da una «calotta» perfettamente regolare anziché da un punto (*c*). Questo effetto di regolarizzazione avviene in un tempo immaginario, sicché non è in contraddizione con i teoremi della singolarità che si riferiscono al tempo reale. Immediatamente dopo l'inizio quantistico, l'universo cominciò a evolvere in modo classico nel tempo reale.

c
TEMPO
IMMAGINARIO

riduce a un punto. Ma nella teoria quantistica il metodo della somma delle storie ammette molte storie possibili, non solo quelle classiche, e diventa fattibile una chiusura regolare. In particolare si può considerare che la formazione della zona di chiusura avvenga nel tempo immaginario e pertanto sia specificamente non-classica.

Questo ragionamento ha portato a un'altra proposta, o soluzione, per l'equazione di Wheeler-DeWitt. Ricordiamo che la comparsa del tempo immaginario è caratteristica dei fenomeni di tunneling della teoria quantistica: l'universo potrebbe allora essere emerso per effetto tunnel a partire dal «nulla». L'evoluzione descritta dai modelli dell'inflazione e del big bang sarebbe avvenuta successivamente a questa fase. La funzione d'onda del modello di universo senza bordi non ha però le caratteristiche associate in genere all'effetto tunnel: attribuisce un'alta probabilità alla comparsa di un universo classico di grandi dimensioni e bassa densità di energia, mentre un normale processo di tunneling sopprimerebbe la transizione da una dimensione nulla a una molto grande e assegnerebbe la più alta probabilità alla transizione a un universo di piccole dimensioni e alta densità di energia.

Spinti in parte da questa considerazione, Linde e Vilenkin proposero indipendentemente l'ipotesi dell'effetto tunnel. La teoria è formulata in termini matematici, ma per averne un'idea basta dire che è concepita per individuare una soluzione dell'equazione di Wheeler-DeWitt che possieda le proprietà di un processo di tunneling. La soluzione ottenuta dai due studiosi chiarisce il concetto di un universo formatosi per un processo di tunneling a partire dal «nulla».

Il modello di universo senza bordi e quello di tunneling selezionano un'unica funzione d'onda per l'universo (condizionata, comunque, dalla risoluzione di un certo numero di difficoltà tecniche esposte di recente da Hartle, da Jorma Louko dell'Università dell'Alberta e da me). In entrambi i modelli la funzione d'onda indica che, in accordo con le osservazioni, lo spazio-tempo si comporta classicamente quando l'universo è qualche migliaio di volte superiore alla dimensione in cui le quattro forze della natura sarebbero unificate (circa 10^{-33} centimetri). Ma se l'universo ha dimensioni inferiori, la funzione d'onda indica che lo spazio-tempo classico non esiste più.

Data una particolare funzione d'onda dell'universo, ci si può chiedere: «Come ha avuto veramente inizio l'universo?». Più che tentare una risposta, il cosmologo riformulerebbe la domanda. Secondo le funzioni d'onda risultanti dal modello di tunneling o da quello di universo senza bordi la relatività generale classica non è più valida nei pressi di una singolarità. Inoltre le nozioni di spazio e tempo implicite nel problema diventano inappropriate. Il quadro che ne esce è quello di un universo con dimensione non nulla e densità di energia finita (anziché infinita) che emerge da una nebulosità quantistica.

Le storie possibili dell'universo, raffigurate dalle linee verdi, emergono da una «nebulosità quantistica», come indicano le funzioni d'onda del modello di universo senza bordi e di quello di tunneling. La nebulosità circonda la singolarità iniziale (definita classicamente), ma un osservatore che guardi indietro nel tempo vedrebbe emergere le storie da una regione di dimensione finita senza che vi siano singolarità.

Dopo questo inizio quantistico, la funzione d'onda assegna valori di probabilità ai differenti percorsi evolutivi, uno dei quali include l'inflazione postulata da Guth. Sebbene alcuni teorici dissentano, entrambe le ipotesi, quella di universo senza bordi e quella di tunneling, sembrano prevedere le condizioni necessarie per l'inflazione, eliminando così la necessità di assunzioni riguardo alla materia associata ai campi scalari che ha provocato la rapida espansione.

Le due ipotesi consentono anche di fare a meno delle assunzioni riguardanti le perturbazioni di densità. Sebbene l'inflazione spieghi l'origine di queste perturbazioni, la loro esatta forma e ampiezza dipendono da certe ipotesi circa lo stato iniziale della materia associata ai campi scalari. Il modello inflazionario assume che le parti non omogenee abbiano avuto origine nel loro stato quantico fondamentale, ossia quello di minore energia compatibile con il principio di indeterminazione.

Ma nel 1985 Hawking e io dimostrammo che questa ipotesi deve essere una conseguenza della proposta di universo senza bordi: il genere di disomogeneità che emerge naturalmente dalla teoria è quello corretto. Secondo l'ipotesi di universo senza bordi, la calotta terminale del tubo dello spazio-tempo deve essere perfettamente liscia e regolare; tale condizione implica che in quella zona le disomogeneità debbano essere nulle. Via via che si procede lungo il tubo nel tempo immaginario le fluttuazioni crescono, e fanno il loro ingresso nella regione di tempo reale con l'ampiezza minima possibile, proprio come le fluttuazioni dello stato quantico fondamentale richieste dal modello inflazionario. L'ipotesi di tunneling porta a previsioni simili per analoghe ragioni.

Così arriviamo a una possibile risposta. In base al quadro offerto dalla cosmologia quantistica, l'universo apparve da una nebulosità quantistica, giunse all'esistenza per effetto tunnel e prese quindi a evolvere in modo classico. L'aspetto più convincente di questo quadro è che le assunzioni necessarie per il modello di universo inflazionario

Il modello della tettonica delle zolle dimostra di mantenere la sua validità nel nuovo quaderno di Le Scienze in vendita da febbraio in edicola e in libreria.
Scelti da Felice Ippolito, 10 fondamentali articoli per capire i meccanismi che sono alla base della formazione dei continenti.

Sei QUADERNI all'anno
Prezzo di copertina: L. 9500.

In questo numero:

Da Wegener a noi di F. Ippolito
La tettonica a zolle crostali di J.F. Dewey
La Dorsale medio-oceanica di K.C. Macdonald, P.J. Fox
La crescita del Nord America di D.L. Jones, A. Cox, P. Coney e M. Beck
Gli Appalachi meridionali di F.A. Cook, L.D. Brown e J.E. Oliver
L'evoluzione delle Ande di D.E. James
La storia dell'India e la formazione dell'Himalaya di E. Garzanti
Evoluzione e struttura delle Alpi di H.P. Laubscher
Il ciclo del supercontinente di R.D. Nance, T.R. Worsley e J.B. Moody
La genesi dei giacimenti metalliferi di G. Brimhall

possono essere racchiuse in una sola e semplice condizione al contorno per la funzione d'onda dell'universo.

Come si può sottoporre a verifica una legge delle condizioni iniziali? Una prova indiretta consiste nel confrontare le previsioni dei modelli quantistici con le condizioni iniziali richieste dai modelli cosmologici classici. Abbiamo visto che in questo tentativo la cosmologia quantistica può vantare un certo successo.

Verifiche osservative più dirette sono difficili. Molte cose sono accadute dalla nascita dell'universo e per ogni stadio evolutivo deve essere costruito un modello separato. È difficile distinguere tra gli effetti che risultano da un particolare insieme di condizioni iniziali e quelli che derivano dall'evoluzione dell'universo o dal modello adottato per una certa fase.

Ciò che serve è l'osservazione di un effetto prodotto nella fase iniziale della vita dell'universo, ma insensibile all'evoluzione successiva. Nel 1987 Leonid Griščuk dell'Istituto di astronomia Sternberg di Mosca fece notare che questo effetto tanto desiderato potrebbe essere fornito dalle onde gravitazionali. Negli scenari di inizio quantistico vengono prodotte onde gravitazionali di forma e ampiezza calcolabili, che interagiscono molto debolmente con la materia nel loro propagarsi nello spazio-tempo. Perciò, quando le osserviamo nell'universo attuale, il loro spettro può ancora contenere la «firma» dell'origine quantistica. Purtroppo la rivelazione delle onde gravitazionali è estremamente difficile e tutti i tentativi compiuti finora sono falliti. Chissà che non vi riescano i nuovi rivelatori la cui costruzione è prevista entro i prossimi 10 anni.

Poiché la verifica della cosmologia quantistica è tanto difficile non possiamo stabilire con certezza se l'ipotesi corretta per la funzione d'onda dell'universo sia quella senza bordi o quella di tunneling. Potrebbe passare ancora molto tempo prima di poter dire se esiste una risposta alla domanda: «Da dove viene tutto questo?». Ciononostante, grazie alla cosmologia quantistica, siamo almeno stati in grado di formulare e affrontare il problema in modo produttivo e molto interessante.

BIBLIOGRAFIA

DeWITT BRYCE S., *Quantum Theory of Gravity, Part 1: The Canonical Theory* in «Physical Review», 160, n. 5, 25 agosto 1967.

HARTLE JAMES B. e HAWKING STEPHEN W., *Wave Function of the Universe* in «Physical Review D», 28, n. 12, 15 dicembre 1983.

HALLIWELL J. J., *Quantum Cosmology*, Cambridge University Press (in stampa).

La cellula staminale

Dà origine alle componenti chiave dei sistemi ematico e immunitario: isolandola e manipolandola, si potranno ottenere nuovi metodi di cura per il cancro, per le malattie immunitarie e per altre gravi patologie

di David W. Golde

Il sangue umano contiene una notevole varietà di cellule, ognuna delle quali è «fatta su misura» per la funzione vitale che deve svolgere. Gli eritrociti, o globuli rossi, trasportano in tutto il corpo l'ossigeno, un gas d'importanza vitale; le minuscole piastrine bloccano le emorragie promuovendo la coagulazione del sangue; i globuli bianchi, che includono linfociti, monociti e neutrofili, sono gli elementi costitutivi del sistema immunitario, che protegge l'individuo dall'azione di tessuti estranei, virus e vari microrganismi.

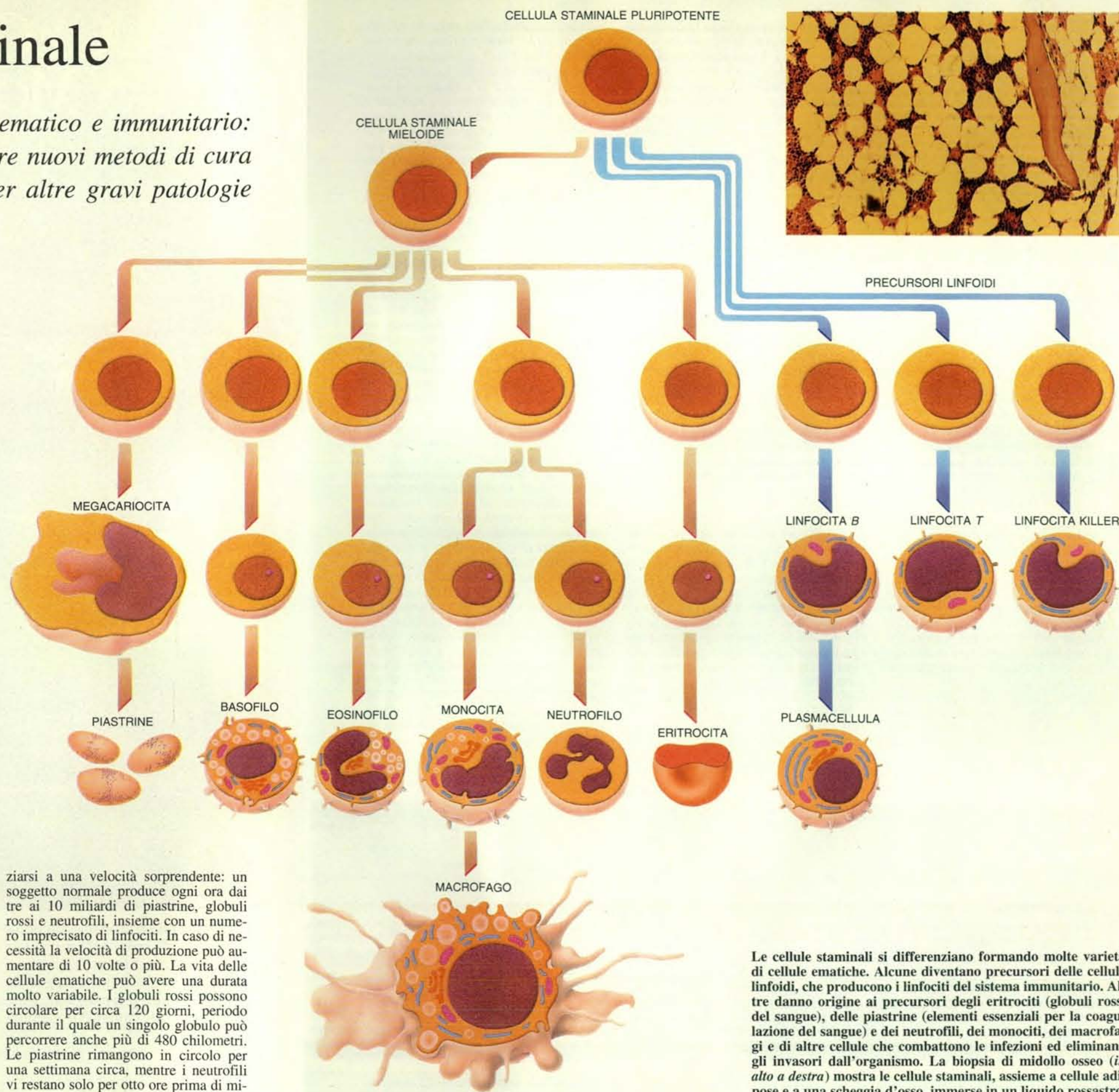
Per quanto possa sembrare sorprendente, tutte queste cellule si sviluppano da un'unica categoria di cellule capostipiti, le cellule staminali ematopoietiche, la cui sede primaria è il midollo osseo. Un danno a queste cellule (per esempio in seguito a chemioterapia o irradiazione o malattia) può rendere inefficienti i sistemi immunitario ed ematopoietico; l'unica terapia sinora efficace in questi casi è il trapianto di midollo osseo. Negli anni recenti le conoscenze sulle cellule staminali sono aumentate enormemente consentendo lo sviluppo di migliori metodi di trapianto del midollo e di promettenti terapie per malattie devastanti come il cancro, l'AIDS, l'anemia aplastica e le malattie autoimmuni.

Questi nuovi metodi di cura dipenderanno da una conoscenza approfondita della natura e del funzionamento delle cellule staminali, le quali possono essere definite cellule in grado di dividersi ripetutamente e di differenziarsi in vari tipi di cellule secondarie. A mano a mano che il differenziamento procede, esse rimarranno sempre più vincolate a una particolare linea di discendenza, fino a che arriveranno a formare un unico tipo di cellula, un precursore che potrà dare origine, per esempio, soltanto a un eritrocita. Qualunque cellula generica che si differenzi in parecchie varietà di cellule più specifiche può essere considerata una cellula staminale, ma in questo articolo, per gli scopi che mi propongo, il termine «cellula staminale» si riferisce solamente alle cellule del sistema ematopoietico.

Nell'embrione umano le cellule staminali del sistema ematopoietico compaiono per la prima volta nel sacco vitellino. Quindi, a mano a mano che lo sviluppo procede, migrano nel fegato. È in questa sede che, durante la vita fetale, vengono prodotte le cellule del sangue, mentre poco dopo la nascita l'ematopoiesi diviene compito esclusivo del midollo osseo. Le cellule staminali fetali differiscono da quelle dell'adulto per il fatto che danno origine a tipi speciali di linfociti oltre che ai globuli rossi, che producono l'emoglobina fetale. Sembra che le cellule staminali fetali possiedano un orologio interno che dice loro quando devono acquisire le caratteristiche delle cellule staminali dell'adulto.

Le cellule staminali hanno una «potenzialità» variabile, possono cioè dare origine a serie diverse di cellule specializzate. Alcune possono duplicarsi più volte, mentre la loro capacità di differenziamento è limitata. La cellula più importante di questa famiglia è la cellula staminale totipotente: in teoria, essa può da sola ricostituire in modo permanente l'intero sistema immunitario e quello ematopoietico. Le cellule staminali dotate di una minore potenzialità, ma ugualmente in grado di differenziarsi in parecchie linee cellulari, sono definite pluripotenti.

Le cellule staminali costituiscono l'elemento principale nei trapianti di midollo osseo. Possono essere tenute in vita assieme alle altre cellule del midollo in un camera criogena ed essere quindi introdotte in un paziente dove riescono a reintegrare i sistemi immunitario ed ematopoietico. Il midollo può essere restituito allo stesso individuo dal quale era stato prelevato (autotrapianto), oppure può essere donato a un individuo diverso (omotrapianto).

I precursori che derivano dalle cellule staminali possono duplicarsi e differenziarsi a una velocità sorprendente: un soggetto normale produce ogni ora dai tre ai 10 miliardi di piastrine, globuli rossi e neutrofili, insieme con un numero imprecisato di linfociti. In caso di necessità la velocità di produzione può aumentare di 10 volte o più. La vita delle cellule ematiche può avere una durata molto variabile. I globuli rossi possono circolare per circa 120 giorni, periodo durante il quale un singolo globulo può percorrere anche più di 480 chilometri. Le piastrine rimangono in circolo per una settimana circa, mentre i neutrofili vi restano solo per otto ore prima di mi-

Le cellule staminali si differenziano formando molte varietà di cellule ematiche. Alcune diventano precursori delle cellule linfoidi, che producono i linfociti del sistema immunitario. Altre danno origine ai precursori degli eritrociti (globuli rossi del sangue), delle piastrine (elementi essenziali per la coagulazione del sangue) e dei neutrofili, dei monociti, dei macrofagi e di altre cellule che combattono le infezioni ed eliminano gli invasori dall'organismo. La biopsia di midollo osseo (*in alto a destra*) mostra le cellule staminali, assieme a cellule adipose e a una scheggia d'osso, immerse in un liquido rossastro.

grare nei tessuti e quindi morire. Per contro, alcuni linfociti possono vivere per anni o forse, addirittura, per tutto l'arco dell'esistenza di un individuo.

Sembra che le cellule staminali, oltre a formare le varie cellule presenti nel circolo sanguigno, siano anche la fonte di un'importante classe di cellule del sistema immunitario, i macrofagi. Questi sono grosse cellule che assomigliano ai monociti per l'aspetto e la funzione, ma diversamente da questi sono presenti nella maggior parte degli organi e non soltanto nel circolo sanguigno. Nel 1976, insieme a E. Donnall Thomas dell'Università di Washington, abbiamo dimostrato che i macrofagi presenti nei polmoni derivano dalle cellule staminali. Abbiamo esaminato i macrofagi di pazienti sottoposti di recente a trapianti di midollo osseo proveniente da donatore di sesso opposto, il che rendeva le cellule trapiantate ben identificabili. Entro tre mesi dal trapianto, tutti i macrofagi da noi esaminati presenti nel polmone appartenevano al sesso del donatore.

Due anni dopo, Robert P. Gale dell'Università della California a Los Angeles e io abbiamo dimostrato che anche i macrofagi presenti nel fegato hanno origine da cellule staminali del midollo osseo. Da queste cellule derivano inoltre, secondo le indagini condotte da altri ricercatori, i macrofagi presenti nella cute e nel cervello, come pure gli osteoclasti (un tipo di macrofagi che riassorbe e rimodella l'osso).

Nel 1961 J. E. Till ed E. A. McCulloch dell'Università di Toronto hanno compiuto notevoli passi avanti nella comprensione dell'ubicazione e dell'attività delle cellule staminali esponendo topi a dosi letali di radiazioni (e distruggendone così i sistemi immunitario ed ematopoietico) e sottoponendoli poi a trapianto di midollo osseo proveniente da un donatore sano, geneticamente compatibile. Circa 12 giorni dopo i due ricercatori hanno asportato la milza dai topi irradiati e conteggiato le colonie di cellule ematopoietiche che si erano sviluppate in essa. Hanno così trovato che il numero delle colonie rifletteva quello delle cellule staminali originariamente inoculate. Queste colonie presenti nella milza si erano evidentemente sviluppate da una popolazione di cellule staminali, anche se non derivavano necessariamente dalla cellula staminale totipotente primitiva.

L'isolamento delle cellule staminali dalla massa di cellule del midollo osseo è un compito arduo. Nel 1988 Gerald J. Spangrude e Irving L. Weissman della Stanford University, insieme ad alcuni colleghi, hanno separato i vari tipi di cellule presenti nel midollo osseo di topo mediante una serie di anticorpi monoclonali, proteine complesse che si legano solo ad antigeni presenti su tipi cellulari specifici. In questo modo hanno identificato una sottopopolazione di cellule, corrispondente a meno dello 0,1 per cento delle cellule presenti nel midollo, che era in grado di ricostituire in modo permanente i sistemi immunitario ed ematopoietico nei topi esposti a dosi letali di radiazioni.

Sembra che questa sottopopolazione sia notevolmente ricca di cellule staminali primitive. Topi che avevano ricevuto dosi letali di radiazioni sopravvivevano nel 50 per cento dei casi se in essi venivano iniettate anche solo 30 di queste cellule. Ihor R. Lemischka della Princeton University, assieme ai suoi collaboratori, ha condotto esperimenti analoghi progettati in modo da selezionare le cellule staminali dal fegato fetale di topo. Anche in questo caso è stata trovata una sottopopolazione di cellule, che rappresenta dallo 0,1 allo 0,2 per cento delle cellule del fegato fetale e che contiene la cellula staminale totipotente.

Nel 1984 Curt Civin della Johns Hopkins University ha isolato un anticorpo monoclonale che riconosce una linea di cellule leucemiche ben nota (la KG-1), ottenuta da H. Phillip Koeffler e da me all'Università della California a Los Angeles. Questo anticorpo si è dimostrato utile per marcare la cellula staminale nella specie umana in quanto reagisce a un marcatore proteico (o antigene) di tale cellula, il CD34. Questo marcatore si trova sulle cellule staminali umane più primitive e su altri precursori delle cellule del sangue derivati dalla cellula staminale totipotente. Le cellule che si legano all'anticorpo isolato da Civin possono essere separate dal resto della popolazione. Nei babbuini è stato dimostrato che le cellule del midollo osseo isolate per mezzo del CD34 riescono a ricostruire il sistema ematopoietico nei soggetti che hanno subito un'irradiazione letale. Pertanto tra le cellule del midollo osseo che rispondono positivamente al CD34 devono esservi cellule staminali pluripotenti, anche se queste cellule staminali primitive costituiscono solo una piccola parte della popolazione.

Altri ricercatori hanno elaborato metodi per isolare ulteriormente le cellule staminali dalle cellule che si legano al CD34. Per esempio, Charles Baum e collaboratori della Systemix, Inc., di Palo Alto, in California, hanno compiuto notevoli passi avanti nella separazione delle cellule staminali umane servendosi di anticorpi monoclonali che selezionavano positivamente o negativamente la potenzialità di queste cellule. Essi hanno adottato un'impostazione molto particolare della ricerca, servendosi di topolini bianchi affetti da immunodeficienza (topi SCID), nei quali erano stati trapiantati frammenti di timo e di osso umani. Le cellule staminali umane separate, iniettate nei topi, si duplicano e si differenziano rapidamente, popolando i frammenti di timo con linfociti umani e i frammenti di osso con cellule mieloidi primitive. In questo modo si possono studiare le cellule staminali umane in un organismo vivente.

Per scopi terapeutici sarebbe auspicabile controllare il differenziamento delle cellule staminali e indurre la moltiplicazione di quelle pluripotenti. Sapere come una cellula staminale «decida» di dividersi o di differenziarsi rimane una questione fondamentale irrisolta della fisiologia delle cellule staminali. A proposito del differenziamento di tali cellule esistono due grandi scuole di pensiero. Secondo la concezione deterministica, il differenziamento è diretto da influenze esterne, comprendenti anche i segnali ormonali. Secondo la concezione stocastica concorrente, la decisione di autorinnovarsi o di differenziarsi, come pure quella sulla linea di discendenza da seguire, avviene in modo casuale.

Per cercare di risolvere la controversia, Makio Ogawa della Medical University of South Carolina a Charleston ha progettato un metodo per coltivare su gel semisolido colonie di cellule staminali umane. Ha prelevato singole cellule dalle prime colonie formatesi e le ha utilizzate per dare origine a colonie secondarie. Egli ha trovato che le cellule di queste colonie secondarie si sviluppavano in una grande varietà di tipi cellulari, indicando così che le cellule staminali presenti nelle colonie originarie si differenziavano casualmente lungo parecchie linee cellulari. Separando coppie di cellule staminali appena divise al fine di ottenere due colonie indipendenti, Ogawa ha scoperto che anche queste mostravano un differenziamento casuale. I suoi risultati sono conformi a un modello stocastico di comportamento della cellula staminale.

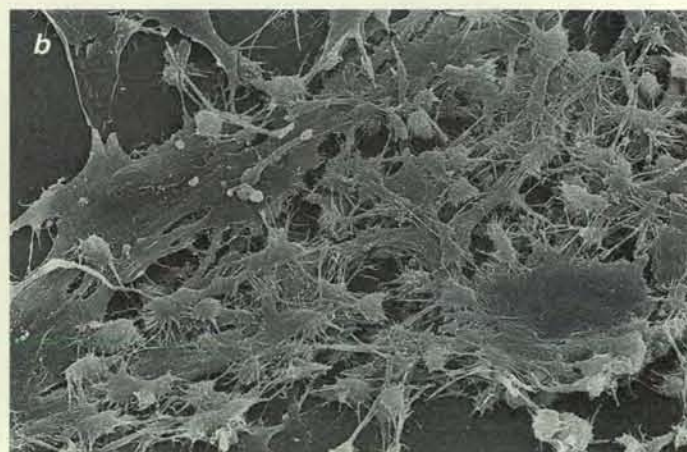
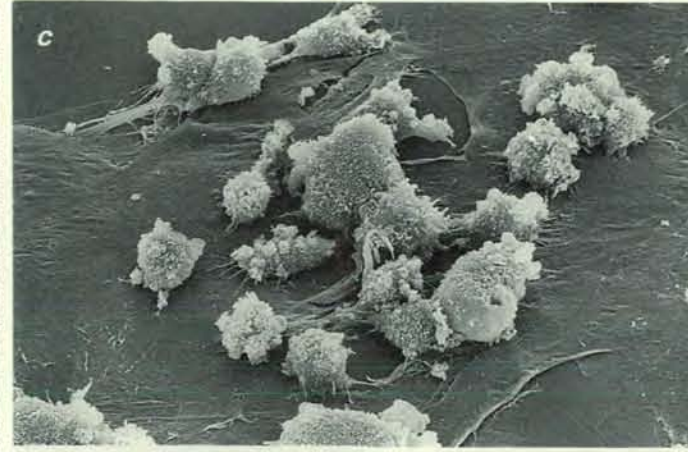
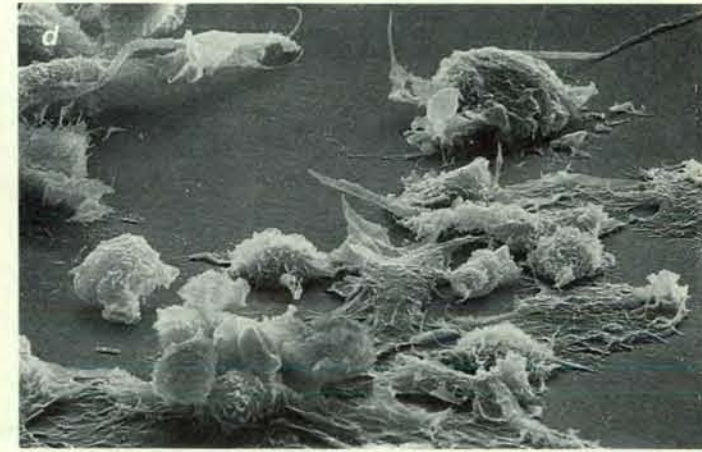
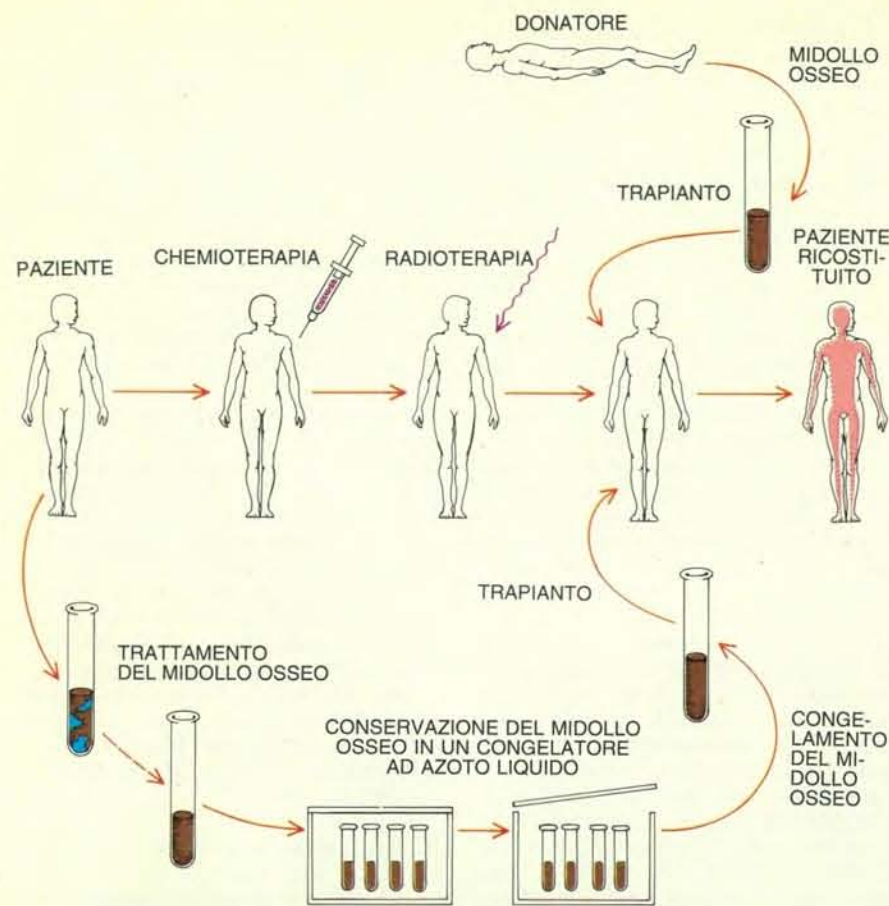
La concezione deterministica sottintende che l'ambiente chimico circostante diriga il differenziamento delle cellule staminali o assegni in qualche modo queste cellule all'una o all'altra di parecchie possibili vie di sviluppo. Le cellule di sostegno (o cellule dello stroma) e varie molecole che si legano alle cellule staminali presenti nel midollo potrebbero fornire a tali cellule segnali per il differenziamento in modi che non si possono misurare quando le colonie di cellule sono studiate in colture prive di stroma.

A un certo punto, una cellula staminale esprime i recettori che la rendono sensibile agli ormoni dell'organismo che regolano la produzione delle cellule sanguigne. La cellula staminale è allora in grado di proliferare in risposta al segnale ormonale. Questo stadio è di importanza decisiva nel processo di differenziamento. Nessuno sa, tuttavia, che cosa regoli l'espressione iniziale di questi recettori o precisamente quali recettori esistano sulle cellule staminali totipotenti più primitive. A mio parere, pertanto, le teorie stocastica e deterministica dello sviluppo delle cellule staminali non si escludono a vicenda e, di fatto, è probabile che possano verificarsi entrambi i meccanismi.

I ricercatori che tentano di saperne di più sul comportamento delle cellule staminali vorrebbero poterle studiare nel loro ambiente naturale, il midollo osseo, ma un procedimento del genere è decisamente impraticabile. Negli anni settanta Michael Dexter e collaboratori del Paterson Institute for Cancer Research di Manchester, in Inghilterra, hanno elaborato un sistema che consente di coltivare *in vitro* cellule staminali umane, permettendo così l'osservazione della crescita e dello sviluppo di tali cellule in condizioni analoghe a quelle esistenti nel midollo osseo umano. Nel midollo reale, i tessuti di sostegno offrono un ambiente favorevole allo sviluppo delle cellule del sangue. Nel sistema di Dexter, invece, le cellule ematopoietiche (ivi comprese le cellule staminali) crescono in un flacone le cui pareti sono rivestite da uno strato di sostegno costituito da midollo osseo «artificiale». Questo strato si compone di cellule e di materiale organico estratto dal midollo osseo. In esso sono presenti molti componenti del midollo naturale, tra cui fibroblasti, cellule adipose, cellule endoteliali e macrofagi. La coltura contiene anche molte proteine della matrice (come il collageno, la fibronectina, la laminina e le emonectine) che svolgono apparentemente un ruolo nella duplicazione e nel differenziamento delle cellule ematopoietiche. Le cellule che tappezzano le pareti del flacone sono in grado di produrre ormoni che regolano la divisione cellulare e altri aspetti della produzione e del differenziamento delle cellule del sangue.

Altri costituenti dello strato aderente alle pareti possono facilitare l'attività degli ormoni che promuovono la crescita delle cellule del sangue. Le colture a lungo termine consentono che la produzione di cellule ematiche continui per due o tre mesi, un tempo sufficiente perché i ricercatori possano analizzare i fattori che regolano la crescita e lo sviluppo delle cellule staminali e identificare i ruoli ancora poco compresi di vari elementi dello stroma. Un giorno o l'altro queste colture potranno venire utilizzate per ottenere grandi quantitativi di cellule staminali da utilizzare nella terapia dei trapianti.

Prendendo le mosse da questi studi, parecchi esperimenti recenti hanno rivelato nuovi particolari sul modo in cui i fattori ormonali regolano l'ematopoiesi e su come l'ambiente del midollo osseo influisca sull'attività delle cellule staminali. Questi fattori possono avere un'importanza estrema nella cura delle malattie in quanto svolgono un ruolo chiave nel costringere le cellule staminali primitive a duplicarsi. È stato trovato che parecchi ormoni stimolano la duplicazione delle cellule di tipo precoce, che sono precursori delle altre cellule del sangue, ma in qualche modo differenziati e pertanto non più vere cellule staminali totipotenti. Questi ormoni includono il fattore che stimola le colonie di

Superfici di midollo osseo artificiale, o strati stromatici, permettono colture a lungo termine delle cellule staminali e delle cellule ematiche da esse derivate. Le colture di midollo osseo (*a*) contengono cellule, ormoni e proteine di norma presenti nel midollo. Dopo alcune settimane le cellule ematiche iniziano a svilupparsi sullo strato stromatico coltivato (*b* e *c*) e poi aderiscono allo strato artificiale, interagendo con esso (*d*), proprio come fanno nel midollo osseo all'interno dell'organismo.

Il trapianto di midollo osseo viene utilizzato in pazienti le cui cellule staminali sono state danneggiate dalla leucemia, da altre forme di cancro o da tossine di origine sconosciuta. I donatori e i riceventi devono appartenere a tipi tissutali compatibili, altrimenti le cellule staminali trapiantate non attecchiscono. Il midollo di un paziente può essere prelevato e conservato prima che egli venga sottoposto a chemioterapia o a radioterapia per la cura del cancro. In seguito può essere reintrodotto nel paziente per sostituire le cellule staminali distrutte nel corso del trattamento.

granulociti (G-CSF, dall'inglese *granulocyte colony-stimulating factor*), l'interleuchina-6, l'interleuchina-11 e una molecola descritta di recente e spesso citata come fattore delle cellule staminali.

Quest'ultimo fattore ha un interesse particolare in quanto è stato identificato come l'ormone che interagisce con un recettore cellulare prodotto dall'oncogène cellulare *c-kit*. Il recettore è presente sulle cellule pigmentate (melanociti) e sulle cellule ematopoietiche. Si sa che un ceppo di topi allevato in modo da contrarre anemia e anomalie nella pigmentazione (il che significa produrre globuli rossi e melanociti malfunzionanti) possiede anche recettori difettosi per l'oncogène *c-kit*. Di recente alcuni ricercatori hanno dimostrato che un altro tipo di topo, affetto da un'anemia di origine genetica e con midollo osseo difettoso, è privo della capacità di produrre il fattore delle cellule staminali. Evidentemente questo fattore agisce sulle cellule staminali, anche se non sembra trattarsi del fattore di autorinnovamento a lungo cercato. Questi risultati stanno mettendo in chiaro le connessioni esistenti tra i diversi ormoni presenti nel midollo osseo e il comportamento delle cellule staminali.

Lo scopo ultimo della ricerca sulle cellule staminali è quello di migliorare i metodi per la cura delle malattie del sangue e del sistema immunitario. I trapianti di midollo osseo vengono eseguiti attualmente per ripristinare i sistemi immunitario ed ematopoietico di pazienti affetti da forme leucemiche e tumorali oppure danneggiati dalla chemioterapia, dalla radioterapia o da altri agenti. Al momento, l'unico modo per procurarsi una sufficiente quantità di cellule staminali consiste nell'aspirare con un ago e una siringa il midollo osseo di un donatore compatibile, un procedimento relativamente impegnativo che richiede generalmente l'anestesia totale.

I trapianti di midollo presentano anche numerosi ostacoli di carattere clinico. Il ricevente deve disporre di un rifornimento costante di globuli rossi appena prodotti, di piastrine e di antibiotici per parecchie settimane, fino a quando le cellule staminali trapiantate cominciano a produrre notevoli quantità di elementi del sangue maturi. Il sistema immunitario del ricevente deve essere sufficientemente represso, in modo da non causare il rigetto delle cellule staminali trapiantate. Nel contempo, le cellule del sistema immunitario prodotte dalle cellule staminali del donatore possono riconoscere come estraneo il loro nuovo ospite (una reazione nota come malattia del trapianto contro l'ospite, o GVHD, dall'inglese *graft versus host disease*), nel qual caso possono provocare danni letali ai tessuti e agli organi. Pertanto, il ricevente deve essere protetto dall'attacco del sistema immunitario di recente formazione.

Nei pazienti che sono affetti da leucemia acuta, o da altre neoplasie che colpiscono il sangue, le cellule tumorali devono essere eliminate perché il trapianto possa avere successo. In casi come questi, una forma blanda di GVHD, detta malattia del trapianto contro la leucemia, è in realtà auspicabile. Sembra che le cellule immunitarie derivate dalle cellule staminali del donatore siano in grado di distruggere o perlomeno di tenere sotto controllo le relativamente poche cellule leucemiche rimanenti. Indagini a livello molecolare dimostrano che alcuni pazienti, apparentemente guariti da una leucemia mielogena (cioè dipendente dal midollo) grazie a un trapianto omologo di midollo, possiedono ancora una piccola popolazione di cellule leucemiche. L'evidente capacità delle cellule staminali trapiantate di tenere a bada le cellule leucemiche nel ricevente ha valore per la terapia, ma è difficile da controllare in quanto l'effetto del trapianto contro la leucemia è strettamente legato alla GVHD.

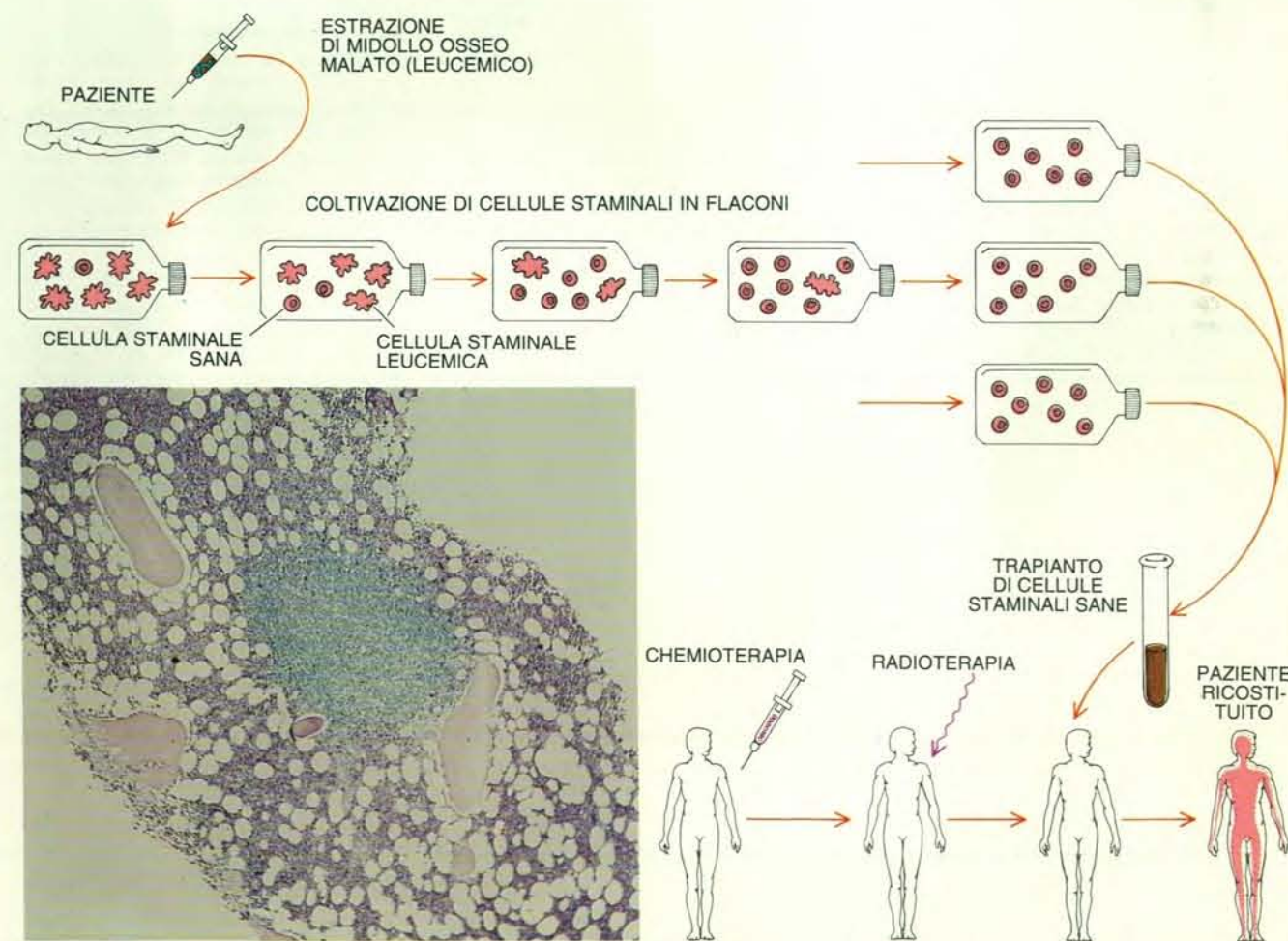
Dato che le cellule staminali trapiantate possono ricostituire il sistema immunitario, la tecnica è stata utilizzata per curare malattie genetiche in cui i linfociti funzionino male, per esempio la sindrome da immunodeficienza grave combinata. I trapianti di cellule staminali possono anche servire per curare le malattie metaboliche che comportano alterazioni a carico dei macrofagi, come l'osteopetrosi (che porta alla formazione di tessuto osseo eccessivamente denso) e la forma grave della malattia di Gaucher (caratterizzata, tra l'altro, da anemia e alterazioni ossee). Analogamente, possono servire a curare difetti congeniti dell'ematopoiesi, come la talassemia e l'anemia falciforme (alterazioni a carico dell'emoglobina presente nei globuli rossi), l'anemia di Fanconi (un'alterazione delle cellule staminali che porta a un'insufficienza del midollo osseo) e infine la malattia granulomatosa cronica (una grave alterazione enzimatica nei globuli bianchi del sangue).

I donatori di midollo osseo sono in genere fratelli e sorelle i cui tipi tissutali siano compatibili, ma talvolta anche individui senza alcun legame di parentela selezionati con il metodo della tipizzazione HLA. La tipizzazione tissutale HLA presenta parecchi vantaggi: si possono fornire cellule staminali a soggetti che non abbiano un fratello o una sorella che funga da donatore, cosicché un ricevente può disporre di molteplici donatori; inoltre può ottenersi l'effetto positivo della GVHD. In Europa e negli Stati Uniti sono stati predisposti registri di candidati alla donazione che sono stati sottoposti a tipizzazione HLA. Lo US National Marrow Donor Program, che si svolge sotto l'egida dei National Institutes of Health, ha schedato fino a oggi circa 330 000 donatori tipizzati [in Italia il numero dei donatori tipizzati ha superato i 10 000, *n.d.r.*].

Nonostante questi registri, la probabilità di trovare un donatore di midollo estraneo, ma compatibile rimane scarsa (circa uno su quattro tra i bianchi). La probabilità di riuscire ad abbinare donatore e ricevente è ancora più scarsa tra le minoranze e tra coloro che hanno un retaggio etnico misto, in quanto sono poco rappresentati nei registri. Inoltre il midollo di un donatore non affine può non riuscire ad attecchire o essere rigettato nel 10-20 per cento dei casi e una GVHD grave può manifestarsi all'incirca nel 50 per cento dei trapianti.

Non è però necessario che il midollo provenga da un altro individuo. In un procedimento noto come trapianto autologo, le cellule staminali vengono prelevate da un paziente e conservate al di fuori dell'organismo, mentre questo viene sottoposto a chemioterapia o radioterapia nel tentativo di distruggere le cellule neoplastiche. Il trapianto autologo permette di utilizzare dosi elevate per entrambe le terapie, senza il rischio di distruggere in maniera permanente la capacità dell'organismo di rimpiazzare il sangue e le cellule del sistema immunitario. Il midollo osseo viene estratto, congelato e conservato; in seguito viene reintrodotto per via endovenosa. (Le cellule staminali finiscono comunque per tornare al midollo osseo.)

In questo modo i trapianti autologhi di midollo permettono di aggirare gli effetti potenzialmente letali della chemioterapia per il cancro sulle cellule ematopoietiche. Essi eliminano, inoltre, la necessità di trovare un donatore compatibile di midollo ed evitano il rischio che il ricevente sia colpito dalla malattia del trapianto contro l'ospite. D'altra parte, le cellule staminali reintegrate nel loro ambiente non producono di norma l'effetto del trapianto contro il tumore. Il midollo osseo dei pazienti che potrebbero beneficiare maggiormente di un trapianto autologo potrebbe inoltre essere già invaso da cellule neoplastiche; è questo il caso soprattutto dei pazienti affetti da leucemia o da linfoma (cioè da una crescita neoplastica a livello del sistema linfatico).

La possibilità di separare le cellule staminali neoplastiche da quelle sane nel midollo osseo di un paziente avrebbe implicazioni mediche importanti; perciò i ricercatori hanno tentato parecchi modi per purificare il midollo eliminando le cellule tumorali. I metodi che hanno

Sembra che le colture di midollo osseo stimolino le cellule staminali sane a riprodursi più velocemente delle cellule leucemiche. Col tempo, si potrebbe ottenere una popolazione di cellule staminali sane da midollo ammalato (come il midollo colpito da linfoma della fotografia). In questo caso i pazienti potrebbero essere sottoposti a chemioterapia o a radioterapia per distruggere le cellule malate e poi ricevere un'iniezione di cellule staminali sane derivate dal loro stesso organismo.

adottato fino a questo momento comportano l'impiego di anticorpi monoclonali che contengono il complemento (enzimi distruttivi che si legano agli anticorpi) o alla cui molecola sono attaccate tossine. Un altro metodo consiste nel trattare con la chemioterapia il midollo estratto mentre si trova all'esterno dell'organismo, nel tentativo di distruggere le cellule staminali neoplastiche.

Nessuna delle tecniche di purificazione del midollo finora tentate si è dimostrata veramente efficace; anzi, di fatto, l'attecchimento delle cellule trapiantate può venirne ritardato. Alcuni ricercatori hanno proposto di purificare il midollo osseo da certe cellule tumorali selezionando le cellule che danno una reazione positiva al CD34. Anche altri anticorpi monoclonali possono essere in grado di separare le cellule staminali normali da quelle leucemiche.

Connie J. Eaves e collaboratori dell'Università della British Columbia, assieme a Dexter e collaboratori, hanno trovato un mezzo interessante per procedere a una simile separazione. Hanno scoperto che il sistema di coltura a lungo termine tende a inibire la crescita delle cellule leucemiche del midollo in confronto con la crescita normale delle cellule staminali. I due gruppi di ricercatori hanno esaminato il rapporto tra cellule leucemiche e cellule normali in colture di cellule di midollo osseo estratte da pazienti leucemici, e hanno osservato che le cellule leucemiche, mentre sono avvantaggiate per quanto riguarda la crescita rispetto alle cellule staminali normali quando sono all'interno dell'organismo, appaiono in netto svantaggio nelle colture a lungo termine. Altri ricercatori hanno riportato risultati analoghi per differenti cellule leucemiche; la possibilità di coltivare preferenzialmente cellule staminali sane può valere anche per altre forme di cancro. La Eaves, Dexter e i loro collaboratori hanno tentato di utilizzare il sistema delle colture a lungo termine come mezzo per purificare il midollo osseo di un paziente dalle cellule leucemiche pur conservando una riserva di cellule staminali sane e normali. Il procedimento da loro seguito e la loro strategia generale sembrano davvero promettenti.

Indipendentemente dalla loro origine, le cellule staminali devono essere trapiantate in enormi quantità perché i sistemi immunitario ed ematopoietico di un paziente possano ripristinarsi rapidamente. Tuttavia il numero di cellule staminali necessario per avere un buon attecchimento è incerto. Dato che nessuno sa quante cellule staminali siano presenti in un determinato campione di midollo osseo, con i miei collaboratori ho dovuto basarmi sull'esperienza e su estrapolazioni da dati ottenuti su animali per stimare la dose di cellule nei trapianti umani. In generale, abbiamo trovato che era necessario trapiantare 200 milioni di cellule di midollo osseo per chilogrammo di peso corporeo. Dosi inferiori tendono a fare aumentare il rischio che le cellule trapiantate non riescano ad attecchire o siano rigettate. La necessità di questo grande numero di cellule costringe a molteplici estrazioni di midollo osseo. In totale vengono prelevati al donatore dai 500 ai 1000 centimetri cubi di midollo osseo, che vengono poi fatti passare attraverso filtri e quindi somministrati al ricevente o conservati al freddo per un successivo reimpianto nel donatore stesso.

I trapianti di midollo osseo sarebbero molto più efficaci se si riuscisse a trovare un modo per accelerare il processo di attecchimento. Risultati recenti ottenuti in parecchi centri di ricerca medica hanno dimostrato che, somministrando gli ormoni GM-CSF e G-CSF, che sono in grado di stimolare l'ematopoiesi, si riduce nettamente il tempo necessario perché le cellule staminali attecchiscano e il conteggio dei globuli bianchi periferici ritorni a livelli normali.

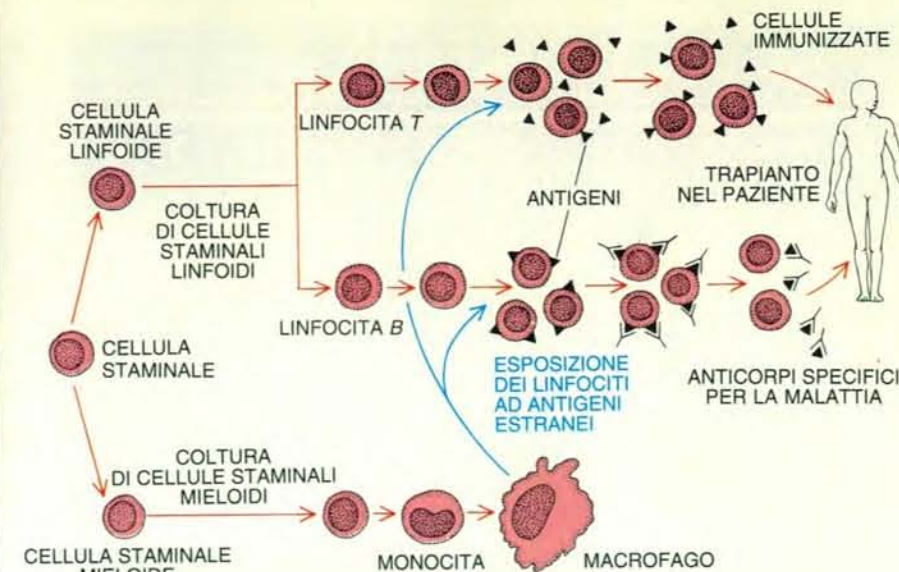
Questi ormoni si dimostrano utili anche in altri modi. Alcuni ricercatori hanno trovato che, aggiungendo cellule staminali ottenute da sangue periferico a cellule staminali di midollo osseo, si fa aumentare in misura significativa la velocità di attecchimento. L'estrazione di un numero sufficiente di cellule staminali da sangue periferico è un procedimento complicato, che comporta ripetuti passaggi del sangue attraverso un separatore di cellule. La somministrazione di GM-CSF o di G-CSF fa aumentare drasticamente la quantità di cellule staminali nel sangue, migliorando così la possibilità di ottenere trapianti di cellule staminali da sangue periferico.

Quando i ricercatori riusciranno a mettere a punto tecniche efficaci per isolare un campione puro di cellule staminali pluripotenti allo scopo di accelerare il processo di attecchimento dei trapianti, sarà possibile mettere in atto strategie innovative per conservare e trapiantare il midollo osseo. Per esempio se una sola estrazione di midollo osseo, eseguita in anestesia locale (che permette di ottenere dai 10 ai 15 centimetri cubi di midollo), fornisse sufficienti cellule per l'attecchimento del trapianto, i singoli individui potrebbero facilmente disporre di una riserva delle loro stesse cellule per eventuali impieghi futuri. Inoltre il procedimento di donazione del midollo sarebbe considerevolmente più semplice e meno gravoso.

Una strategia particolarmente lungimirante permetterebbe a soggetti sani di disporre di una scorta permanente delle proprie cellule staminali da utilizzare qualora se ne presentasse la necessità. Fino a poco tempo fa non esistevano i

CELLULE STAMINALI CONGELATE IN AZOTO LIQUIDO
CELLULE STAMINALI DI SCORTA
ESTRAZIONE DI CELLULE STAMINALI DAL CORDONE OMBELICALE
CORDONE OMBELICALE
COMPARE LA LEUCEMIA
CHEMIOTERAPIA
RADIOTERAPIA
TRAPIANTO
PAZIENTE RICOSTITUITO
NASCITA INFANZIA ADOLESCENZA ETÀ ADULTA

Il sangue del cordone ombelicale contiene cellule staminali attive. Dato che queste cellule si possono conservare a lungo, ognuno potrebbe avere una scorta di cellule staminali sane e compatibili, da utilizzare ogniqualvolta ne sorga la necessità.

Cellule ematiche «su misura» consentiranno presto di attuare nuove terapie. Si potrebbero ottenere linfociti (*in alto a sinistra*) e macrofagi (*in basso a sinistra*) da cellule staminali coltivate. I linfociti *T* potrebbero essere esposti ad antigeni e poi liberati nell'organismo per uccidere le cellule neoplastiche o infettate da virus, e i linfociti *B* potrebbero essere «addestrati» a produrre anticorpi contro malattie specifiche. I macrofagi contribuiscono a presentare gli antigeni ai linfociti *T* e *B*.

mezzi tecnologici per mettere in atto una strategia del genere. Le tecniche standard di estrazione del midollo osseo non si prestano alla raccolta e all'immagazzinamento, come pratica di routine, delle cellule staminali da un ampio segmento della popolazione. Il procedimento per ottenere sufficienti cellule staminali in modo da migliorare l'efficacia dei trapianti potrebbe essere reso molto più semplice se esistesse un sistema per coltivare *in vitro*, cioè all'esterno dell'organismo, le cellule staminali.

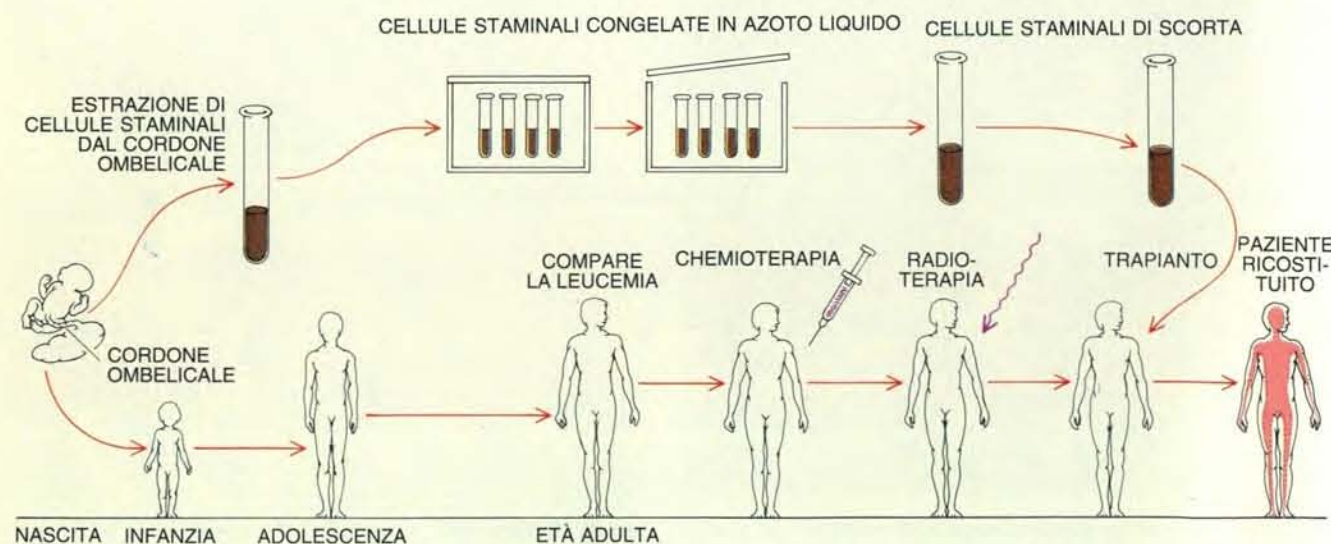
Le colture a lungo termine precedentemente descritte bastano già a mantenere in vita le cellule staminali; modificando questa tecnologia, si potrebbe far sì che un piccolo germe di coltura si sviluppi in una popolazione di cellule di dimensioni notevoli. Quindi la somministrazione di ormoni ematopoietici come GM-CSF e G-CSF potrebbe contribuire a fare aumentare la popolazione di cellule staminali nell'organismo dopo il trapianto. La possibilità di potenziare l'attecchimento servendosi di questi ormoni, assieme alla prospettiva di riuscire a far moltiplicare rapidamente le cellule staminali sia all'interno sia all'esterno dell'organismo, fa sperare che i medici possano riuscire presto a realizzare con successo trapianti partendo da un piccolo campione di cellule staminali.

Il sangue del cordone ombelicale potrebbe essere una fonte importante di un simile campione. Da quasi due decenni i ricercatori sanno che esso contiene i progenitori delle cellule ematiche. Nel 1987, servendosi di colonie di cellule staminali, Ogawa ha dimostrato che il sangue del cordone ombelicale contiene cellule staminali pluripotenti. Edward A. Boyse, che ha lavorato in passato al Memorial Sloan-Kettering Cancer Center, in collaborazione con Harold E. Broxmeyer dell'Indiana University ed Elaine Gluckman dell'Hôpital St. Louis di Parigi, ha pensato di servirsi del sangue del cordone ombelicale per i trapianti; i ricercatori hanno riferito che due pazienti affetti da anemia di Fanconi sono stati sottoposti con successo a trapianti di cellule staminali ottenute dal sangue del cordone ombelicale di fratelli con identica tipizzazione HLA. Di recente alcuni medici del Johns Hopkins Oncology Center hanno curato con successo un bambino leucemico di quattro anni trapiantandogli cellule provenienti dal cordone ombelicale.

Attualmente il sangue del cordone ombelicale viene scartato dopo la nascita, ma potrebbe diventare una fonte preziosa di cellule staminali da mantenere disponibili, in teoria, per tutta la vita dell'individuo. Le cellule staminali e i linfociti presenti nel sangue del cordone ombelicale sarebbero però privi di qualsiasi forma di resistenza alle malattie, che viene acquisita nel corso dell'esistenza; pertanto essi porterebbero alla ricostituzione di un sistema immunitario «primitivo», ossia privo di qualsiasi esperienza, che richiederebbe tempo per produrre gli anticorpi specifici contro le svariate malattie.

La possibilità di formare scorte di cellule staminali provenienti da molti o da tutti gli individui, in special modo scorte di cellule staminali ematopoietiche, raccolte alla nascita, per un impiego di routine, avrebbe profonde implicazioni mediche. Una scorta di cellule staminali sarebbe istantaneamente disponibile per tutte quelle situazioni che attualmente richiedono un trapianto autologo. Inoltre sarebbero evitati i problemi inerenti alla purificazione del sangue o del midollo osseo dalle cellule tumorali. Scorte di cellule staminali potrebbero inoltre essere disponibili per omotrapianti, anche se questo tipo di intervento pone molti problemi organizzativi ed etici.

La prospettiva di formare scorte delle proprie cellule staminali, da utilizzare in qualsiasi momento in caso di bisogno, schiude la via a molteplici possibilità di curare le malattie, che vanno ben oltre la ricostituzione del sistema ematopoietico. A mano a mano che imparano a coltivare certe linee di cellule staminali in laboratorio, i ricercatori dovrebbero anche essere in grado di scoprire modi per prelevare le cellule staminali da un paziente, manipolarle per una qualche finalità terapeutica e quindi reintrodurle nel paziente stesso. Per esempio, si potrebbe riuscire ad alterare le cellule staminali in modo tale che, quando vengono ritrapiantate nell'organismo dal quale sono state prelevate, si differenzino in cellule immunitarie in grado di svolgere nuove funzioni specifiche. Le cellule immunitarie potrebbero anche essere alterate in stadi di sviluppo più avanzati. Per esempio, i linfociti *B*, che si specializzano nella produzione di anticorpi, potrebbero essere coltivati e immunizzati in laboratorio affinché producano anticorpi contro malattie specifiche.

Sorgono così innumerevoli possibilità interessanti. Sarebbe possibile «insegnare» a linfociti *B* in vitro a produrre anticorpi contro cellule neoplastiche o con-

SONO DISPONIBILI I RACCOGLITORI PER IL 1992 DELLA RIVISTA LE SCIENZE

Questi raccoglitori corrispondono ai volumi XLVIII e XLIX de LE SCIENZE e rispettivamente ai fascicoli da gennaio (n. 281) a giugno (n. 286) e da luglio (n. 287) a dicembre (n. 292).
Sono ancora disponibili i raccoglitori dal Vol. XL al XLVII e raccoglitori appositamente non numerati per sostituire quelli esauriti.
I raccoglitori si possono richiedere direttamente all'editore usando l'apposita cartolina allegata alla rivista e unendo il relativo importo; gli ordini vengono evasi solo a pagamento avvenuto.

Ogni raccoglitore L. 6.500

I raccoglitori si trovano anche presso i seguenti punti vendita:
BOLOGNA - Libreria Parolini - Via U. Bassi 14
FIRENZE - Libreria Marzocco - Via de' Martelli 22/R
GENOVA - Libreria Int. Di Stefano - Via R. Ceccardi 40/R
MILANO - Le Scienze S.p.A. - Piazza della Repubblica 8
TORINO - Libreria Zanaboni - C.so Vittorio Emanuele 41
NAPOLI - Libreria Guida A. - Via Port'Alba 20/21
PADOVA - Libreria Cortina - Via F. Marzolo 4
PALERMO - Libreria Dante - Quattro Canti di Città
ROMA - Libreria Feltrinelli - Via V. Emanuele Orlando

tro agenti infettivi come l'HIV (il virus dell'AIDS)? Sarebbe possibile coltivare *in vitro* linfociti *T* citotossici sensibilizzati in modo specifico per riconoscere e uccidere le cellule tumorali o le cellule infettate da virus?

Queste strategie non sono prive di fondamento come potrebbe a prima vista sembrare. David Baltimore della Rockefeller University ha proposto che i linfociti *T* autologhi potrebbero essere resi resistenti all'infezione da HIV, fenomeno che ha chiamato «immunizzazione intracellulare». Eli Gilboa dello Sloan-Kettering ha isolato un gene dall'HIV, il gene *tar*, che si lega a una proteina di cui il virus ha bisogno per duplicarsi e la blocca, ed è riuscito a introdurlo in linfociti coltivati in provetta. I linfociti coltivati che esprimono il gene *tar* sono resistenti all'infezione da HIV. Rimane da vedere se le tecniche che funzionano in provetta funzioneranno altrettanto bene nell'organismo umano.

Se proseguiranno le ricerche secondo questo indirizzo, la medicina potrà imboccare nuove vie per curare le malattie, impiegando metodi che comprenderanno molteplici mezzi per guidare e potenziare le difese naturali dell'organismo. Il percorso per giungere a una migliore prevenzione e cura delle malattie potrà alla fine condurre a ottenere cellule del sistema immunitario equipaggiate per affrontare nel modo più efficiente possibile l'ambiente biologico ostile che le circonda. Il ruolo fondamentale delle cellule staminali nello sviluppo e nel mantenimento dei sistemi ematopoietico e immunitario dell'uomo assicura che esse avranno un'importanza decisiva nella realizzazione di questi scopi.

BIBLIOGRAFIA

GOLDE DAVID W. (a cura), *Hematopoietic Growth Factors* in «Hematology/Oncology Clinics of North America», 3, n. 3, W. B. Saunders Company, 1989.

ISCOVE NORMAN, *Haematopoiesis: Searching for Stem Cells* in «Nature», 347, n. 6289, 13 settembre 1990.

QUESENBERRY P. J., *Hematopoietic Stem Cells, Progenitor Cells, and Growth Factors* in *Hematology*, IV edizione a cura di W. J. Williams, E. Beutler, A. J. Erslev e M. A. Lichtman, McGraw-Hill, 1990.

GULATI SUBHASH, YAHALOM JOACHIM e PORTLOCK CAROL, *Autologous Bone Marrow Transplantation* in «Current Problems in Cancer», 15, gennaio/febbraio 1991.

SPANGRUDE G. J., SMITH L., UCHIDA N., IKUTA K., HEIMFELD S., FRIEDMAN J. e WEISSMAN I. L., *Mouse Hematopoietic Stem Cells* in «Blood», 78, n. 6, 15 settembre 1991.

Modelli frattali di oggetti naturali

Le tecniche iterative, di grandissima importanza nella geometria dei frattali, offrono utili strumenti per ricostruire l'immagine di oggetti familiari per mezzo di funzioni matematiche spesso molto semplici

di Paolo Sommaruga

Il mondo dei frattali appare intricato, ricco di metodi e costruzioni teoriche a volte collegate fra loro a fatica, in cui l'elemento unificante è forse l'intuizione che la complessità nasconde spesso regole semplici. Nell'articolo *Il linguaggio dei frattali* («Le Scienze» n. 266, ottobre 1990), Hartmut Jürgens, Heinz-Otto Peitgen e Dietmar Saupe hanno già descritto tale varietà.

Obiettivo di questo articolo è illustrare come alcuni risultati della teoria dei sistemi di funzioni iterate, la quale si inquadra nell'ambito della geometria frattale deterministica, offrano validi strumenti per costruire un modello matematico dell'immagine di un oggetto, ricercando una figura frattale che la approssimi. Questi modelli, pur contenendo un numero limitato di informazioni, consentono di calcolare e ricostruire su un videoterminale immagini anche di grande complessità. Ciò offrirà altresì al lettore l'opportunità di soffermarsi su un accattivante mondo di immagini che, al tempo stesso, esprimono forme naturali e racchiudono concetti matematici.

Uno strumento fondamentale in matematica e in informatica è l'*iterazione*, che consiste, in sostanza, nella ripetizione di una procedura; tecniche iterative vengono utilizzate per risolvere i più svariati problemi.

Se, per esempio, su una calcolatrice tascabile impostiamo il numero 0,5 e, cambiatolo di segno, lo assumiamo come argomento della funzione esponenziale, otteniamo il numero 0,60653... . Ripetendo la procedura con quest'ultimo numero otteniamo 0,545239... . La decima iterazione ci dà 0,566907... . A questo punto ci si può porre la domanda se questa sequenza di numeri significhi qualcosa, se cioè ci porti o no verso un numero *limite*. Dopo circa 22 iterazioni, la sequenza si stabilizza intorno a 0,567143... . Per la funzione $\exp(-x)$ si tratta di un numero importante: quando è assunto come argomento essa lo restituisce come valore. È, per così dire, un *invariante*:

$$0{,}567143... = \exp(-0{,}567143...)$$

Ciò si esprime dicendo che quel numero è *punto fisso* della funzione $\exp(-x)$. Esso è inoltre il suo unico punto fisso.

Naturalmente, un simile processo iterativo non converge sempre per tutte le funzioni: un esempio classico è la funzione $-\log(x)$. Inoltre, in molti casi, ne scaturisce un comportamento del tutto impredicibile. L'iterazione appare quindi un metodo atto a determinare soluzioni di equazioni espresse nella forma $x = g(x)$, seppur limitato a una sottoclasse di funzioni $g(x)$.

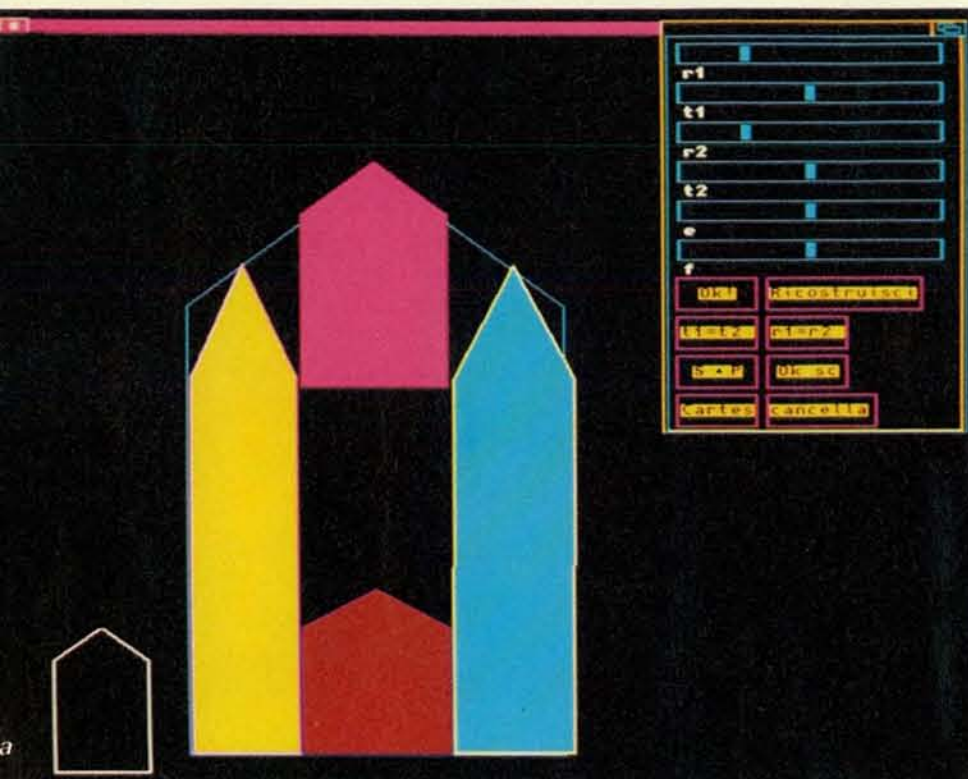
1. Sfruttando la tecnica matematica dell'iterazione di funzioni, è possibile ricostruire, anche a partire da configurazioni geometriche molto semplici, quali per esempio un cerchio contenente quattro ellissi, strutture complesse come quella qui a fianco che richiama alla memoria la corteccia dell'encefalo. Questa illustrazione e le altre immagini digitali dell'articolo sono state fotografate con una Polaroid Camera CI3000 messa cortesemente a disposizione dell'autore dalla DIGIMAIL di Milano.

2. Basta manipolare i parametri di resa perché la quercia, che in alcune illustrazioni può apparire spoglia, acquisisca una folta chioma verde. Grazie a tali parametri, la geometria frattale può essere collocata al confine tra la matematica e l'arte.

Il teorema del punto fisso di Banach, valido in ambienti molto generali, descrive ampie classi di funzioni che ammettono un unico punto fisso. L'importanza del teorema è legata al fatto che, oltre a stabilire un risultato teorico di grande rilevanza, fornisce anche un metodo, l'iterazione appunto, che permette di costruire ciò di cui si garantisce l'esistenza; è raro infatti, in matematica, che teoremi di esistenza siano anche costruttivi. L'iterazione, poi, converge indipendentemente dal punto di partenza.

Classiche applicazioni del teorema del punto fisso si hanno in svariati campi della matematica, dall'analisi reale all'analisi numerica, dalla teoria delle equazioni differenziali... alla geometria frattale, possiamo aggiungere oggi. Le funzioni per le quali vale il teorema devono soddisfare la proprietà di essere particolari trasformazioni che prendono il nome di «contrazioni».

In un ambiente numerico, rappresentato geometricamente dalla retta reale, una semplice contrazione è, per esempio, $x/2 + 1$, dove x è un numero reale. Si riconosce immediatamente che ammette 2 come unico punto fisso (è l'unico numero che soddisfa l'equazione $x = x/2 + 1$). Si arriva a 2 facendo partire l'iterazione da 1, ma anche da qualunque altro numero.

Se consideriamo gli effetti prodotti dalla trasformazione su segmenti e non su singoli punti della retta, ci accorgiamo che essa contrae le distanze: il segmento di estremi 0 e 1 (che ha lunghezza pari a 1) viene trasformato nel segmento di estremi 1 e 3/2 (che ha lunghezza 1/2). La funzione considerata è fra le più semplici che si possano immaginare, un polinomio di primo grado; si tratta cioè di una funzione lineare. (Funzioni lineari non contrattive si ottengono con coefficienti della variabile superiori a 1.)

Se aggiungiamo una dimensione, possiamo passare dalla considerazione dei punti della retta a quella dei punti del piano. Le trasformazioni prendono cioè punti del piano e li portano in altri punti. Le trasformazioni più semplici sono ancora quelle lineari, che prendono il nome di *affini*. Una loro particolarità è quella di produrre deformazioni alquanto «controllate» sulle figure del piano a cui vengono applicate: i segmenti si trasformano comunque in segmenti. Le similitudini, che non producono affatto deformazioni, sono casi particolari di affinità. Le affinità contrattive hanno l'effetto di contrarre la figura. Un punto del piano di coordinate cartesiane (x, y) si sposterà, in seguito alla trasformazione affine, nel punto di coordinate $(ax + by + e, cx + dy + f)$.

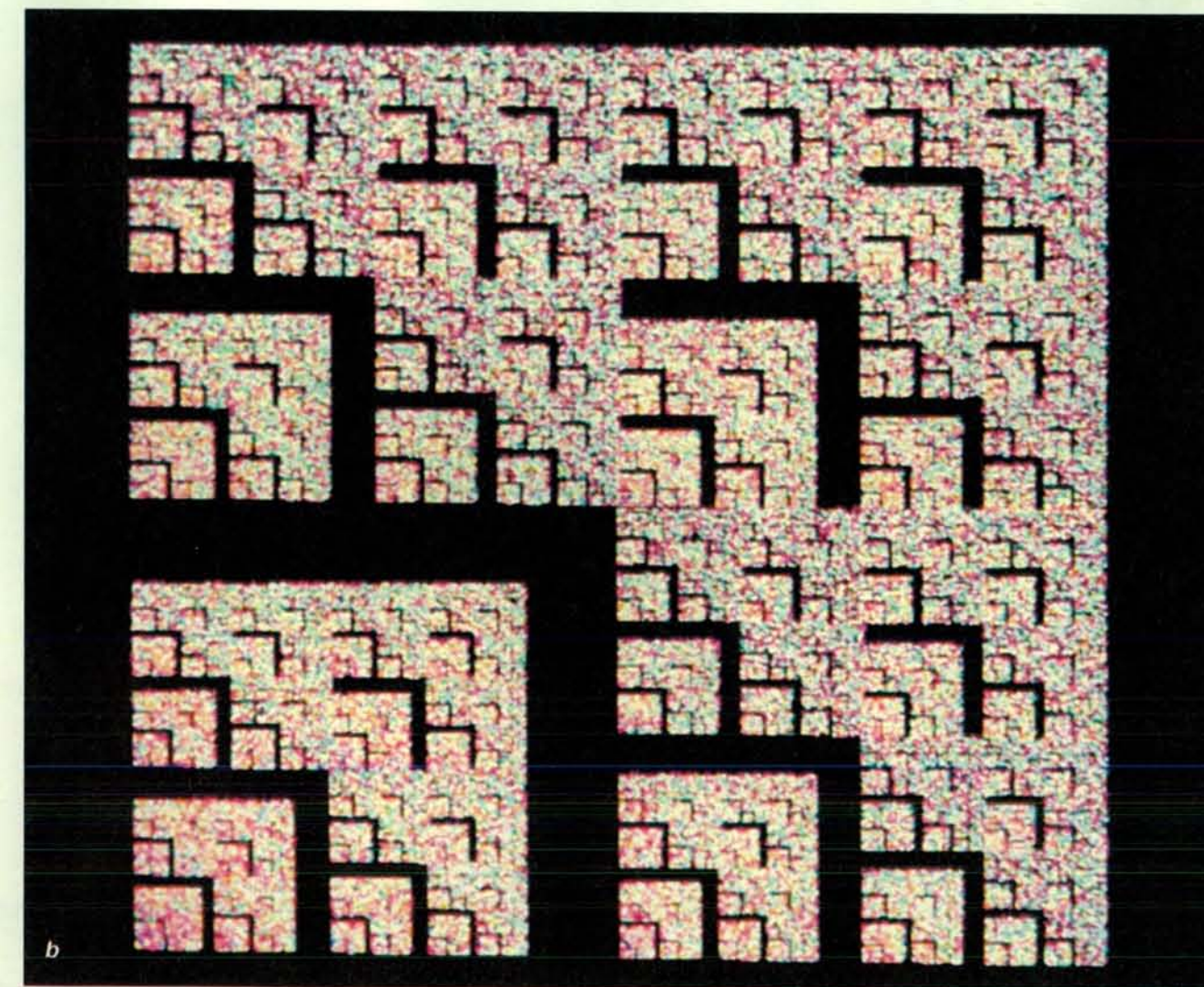
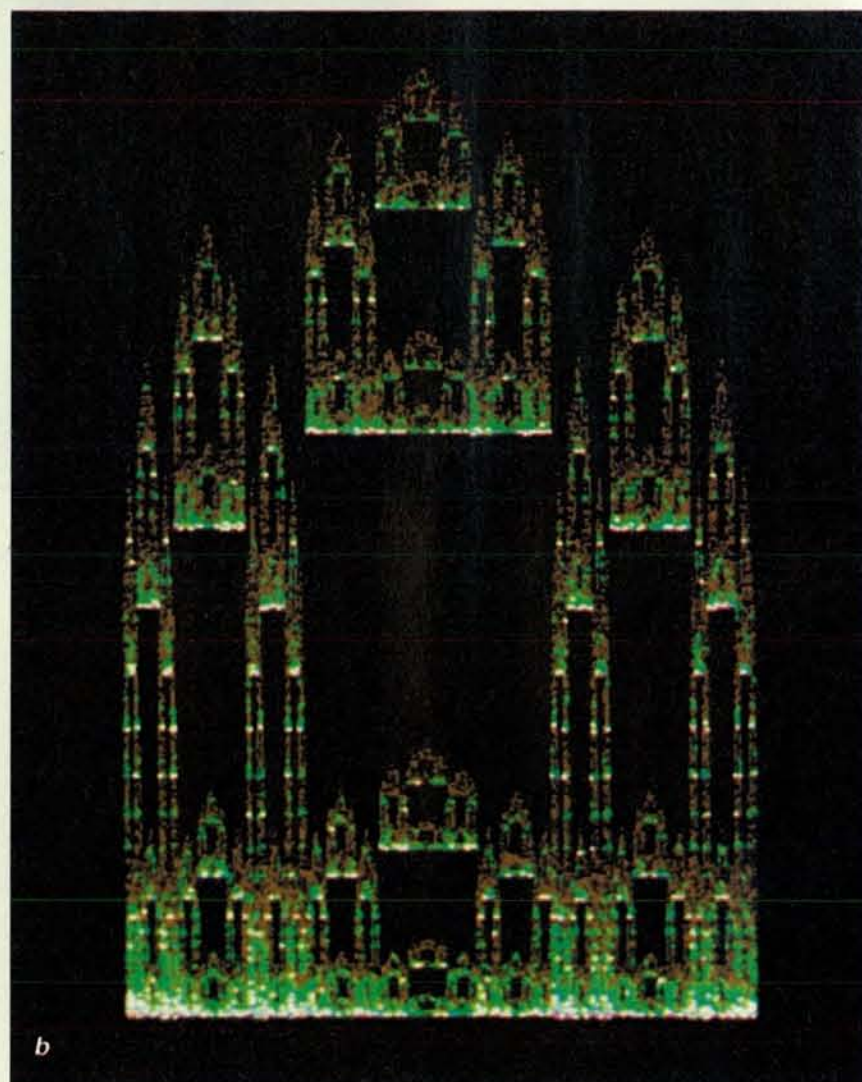
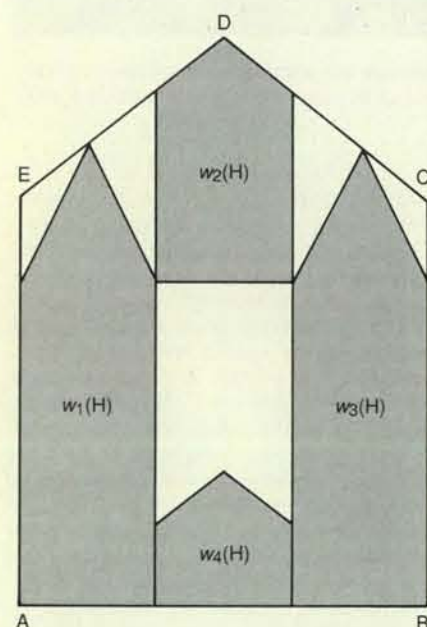
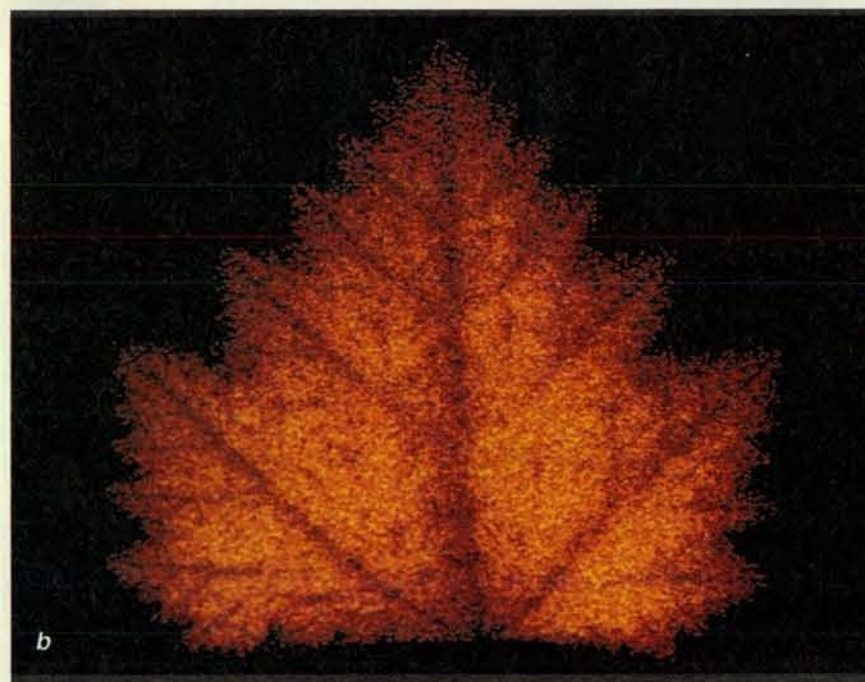
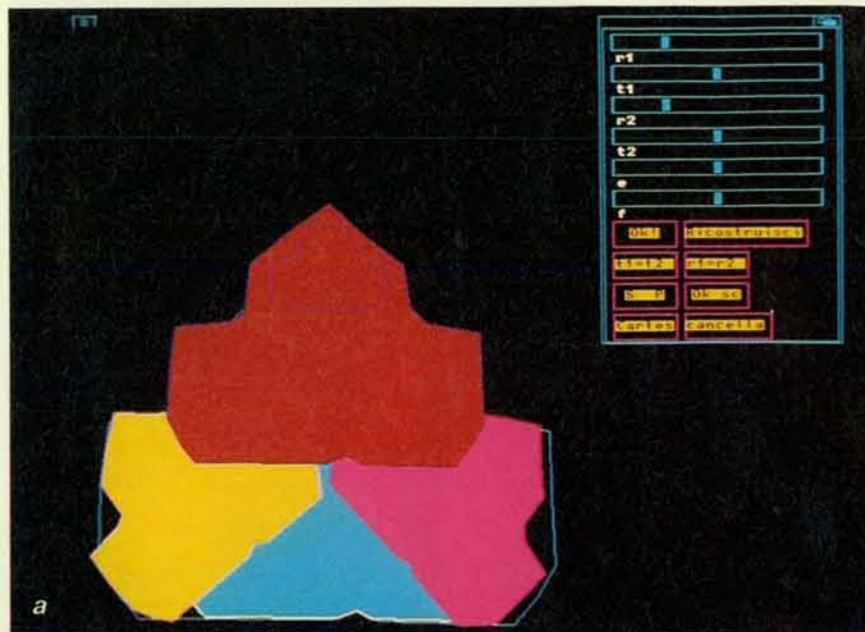
Le affinità nel piano hanno una interessante proprietà che è una conseguenza della linearità. Date due figure, una delle quali sia ottenuta dall'altra tramite trasformazione affine, i sei numeri (a,b,c,d,e,f) che individuano la trasformazione sono univocamente determinati una volta note le coordinate di tre punti su una figura e quelle dei corrispondenti tre punti sull'altra. In tal modo è possibile, per esempio, conoscere la «formula» di ognuna delle quattro trasformazioni contrattive che, agendo sulla casetta di estremi ABCDE dell'illustrazione della pagina a fronte, producono le quattro casette diversamente colorate dell'illustrazione 3a. Si noti che non tutte queste trasformazioni sono similitudini. Se H è la casetta di partenza e w_1, w_2, w_3, w_4 le trasformazioni, indichiamo le nuove casette trasformate con w_1(H), w_2(H), w_3(H), w_4(H).

Insieme, queste quattro trasformazioni ne definiscono una nuova, la trasformazione unione w, che trasforma H nella figura tratteggiata, l'unione - appunto - delle casette trasformate. Poiché w risulta essere contrattiva, per essa vale il teorema del punto fisso; w ammette dunque un unico punto fisso, una figura invariante F che sarà l'unica per la quale:

$$F = w(F) = w_1(F) \cup w_2(F) \cup w_3(F) \cup w_4(F).$$

(Poiché consideriamo le trasformazioni applicate a figure, queste ultime sono i nostri oggetti elementari, i nostri «pun-

3. La cattedrale gotica frattale (*b*) è la figura limite a cui tendono le iterazioni delle trasformazioni contrattive applicate alla casetta ABCDE mostrata qui sotto. In *a*, è rappresentato il collage (ideato dall'autore) che definisce le quattro trasformazioni che generano la cattedrale frattale. La figura risultante è univocamente determinata una volta assegnati 28 coefficienti numerici che definiscono i parametri delle trasformazioni (per ognuna sei coefficienti relativi all'applicazione lineare e uno di resa).

4. La suggestiva immagine della casba (*b*) rappresenta l'attrattore ottenuto per iterazione delle trasformazioni definite dal collage *a*, messo a punto dall'autore.

5. La foglia (*b*), della quale si possono osservare anche le nervature (dovute alla resa dell'immagine, a sua volta legata al valore dei parametri di probabilità), è stata ottenuta con il «gioco del caos» a partire dal collage (*a*) ideato da Michael Barnsley.

ti», la cui totalità costituisce il nostro ambiente di studio.) La nuova figura è inoltre il limite delle iterazioni di w e ha l'aspetto della «cattedrale frattale» dell'illustrazione 3b.

Il teorema del punto fisso ci garantisce che la figura limite non dipende dalla figura iniziale. Utilizzando come figura di partenza un quadrato in luogo della casetta, la figura limite resta la cattedrale frattale, anche se le prime iterazioni producono immagini totalmente differenti.

In effetti, la cattedrale è determinata dalle sole trasformazioni; ne costituisce l'*attrattore*. Da un altro punto di vista, le trasformazioni costituiscono un vero e proprio codice dell'immagine; un codice peraltro molto sintetico, formato da soli 24 numeri, laddove per descrivere l'immagine punto per punto sarebbero necessarie centinaia di migliaia di numeri. Già questo semplice esempio lascia intravvedere la possibilità di «comprimere» le immagini, il che potrebbe rappresentare un'importante applicazione pratica della geometria frattale.

Per portare a compimento tale impresa bisogna però rispondere a una domanda: è possibile codificare in maniera analoga qualunque immagine? Ossia, data una figura bidimensionale, in che modo si può trovare un insieme di trasformazioni il cui attrattore sia sufficientemente «vicino» alla figura, ovvero le assomigli il più possibile?

Nel 1985 Michael Barnsley diede una risposta a questa domanda nel suo «teorema del *collage*», il cui contenuto appare di una tale semplicità che vi fu chi pensò che nascondesse una sorta di trucco. È sufficiente infatti ricoprire l'immagine con piccole copie della stessa deformata con continuità (la contrazione avviene progressivamente, senza strappi). Ciascuna copia definisce un'affinità contrattiva. In effetti l'attrattore è, per definizione,

$$F = w(F) = w_1(F) \cup w_2(F) \cup ... \cup w_n(F)$$

unione di copie deformate con continuità di se stesso. La sua natura è dunque frattale. Osservando la cattedrale frattale (*illustrazione 3b*) e quella che potremmo chiamare l'immagine della casba (*illustrazione 4b*) ce ne rendiamo subito conto; nelle illustrazioni 3a e 4a sono mostrati i rispettivi collage.

Trovare un collage di un'immagine significa quindi stabilire una sua codifica, che non è detto sia unica. Ciò rende difficile per il momento applicare tale teoria al riconoscimento di immagini. Un problema aperto è, in particolare, quello di trovare il collage che contenga il più piccolo numero di trasformazioni.

Anche se da questo punto di vista teorico qualunque immagine può essere codificata, in pratica il processo di creazione di un opportuno collage non è così semplice. Descrivere un'immagine come relazione fra le parti ci impone, di fatto, una diversa visione delle cose. Da parte sua il teorema ci suggerisce che l'immagine, nella sua complessità, celi una regola semplice, un ordine nascosto, ma è nostro il compito di scoprirlo in termini di relazioni.

In questa ricerca il calcolatore può venirci in aiuto ed è possibile che in futuro si arrivi a una procedura del tutto automatica. Nel programma che abbiamo realizzato, l'utente, partendo da un'immagine digitalizzata o da un suo contorno approssimato, costruisce in modo facile e interattivo le trasformazioni che appaiono sullo schermo come copie in piccolo, più o meno deformate, dell'immagine iniziale. Una volta decisa la forma e la posizione, il nuovo pezzettino del collage assumerà un colore diverso da quello degli altri, e si ripeterà l'operazione fino a ricoprire interamente l'immagine.

Accanto a certe forme architettoniche, la cui complessità appare «semplice» se vista con occhi frattali in termini di relazioni, si incontrano anche alcune immagini della natura, che sono anzi forse quelle più note, da quando Benoît B. Mandelbrot parlò dell'esistenza di una «geometria della natura», tanto da intitolare il suo libro *The Fractal Geometry of Nature*. La foglia dell'illustrazione 5b ne è un suggestivo esempio; il suo collage (*illustrazione 5a*) è costituito da quattro trasformazioni. Un altro esempio è dato dalla quercia frattale; per ottenerla è stata fotografata una quercia, stilizzandone il contorno, e con l'ausilio del calcolatore si è ottenuto il collage composto di sei trasformazioni (*illustrazione 6a*); due di esse deformano l'albero per costruirne il tronco. L'attrattore è mostrato nell'illustrazione 6b. Nell'illustrazione 7a vediamo il collage di un paesaggio montano, costituito da dieci trasformazioni, il cui contorno è anch'esso ricavato da una fotografia. Nell'illustrazione 7b è visibile il corrispondente attrattore.

Non solo la natura è frattale, ma possiamo anche divertirci a creare immagini frattali completamente fantastiche; ed è interessante notare come questi collage sembrino figure disegnate da bambini.

Ma se il collage nasce anche dall'intuizione, dalla fantasia, seguendo un percorso creativo, la fase di decodifica, cioè la formazione dell'attrattore, è un processo senz'altro più automatico. Un algoritmo che implementi direttamente le iterazioni di punto fisso di una figura

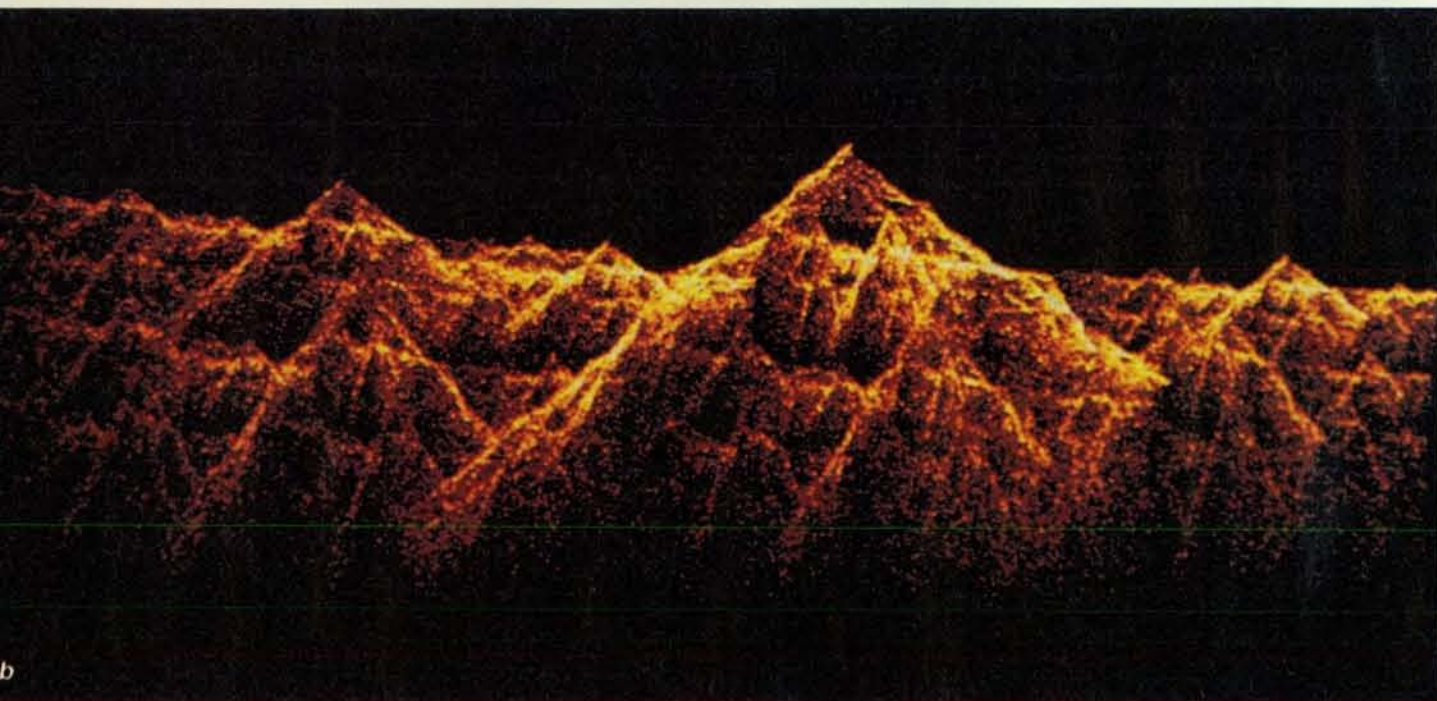
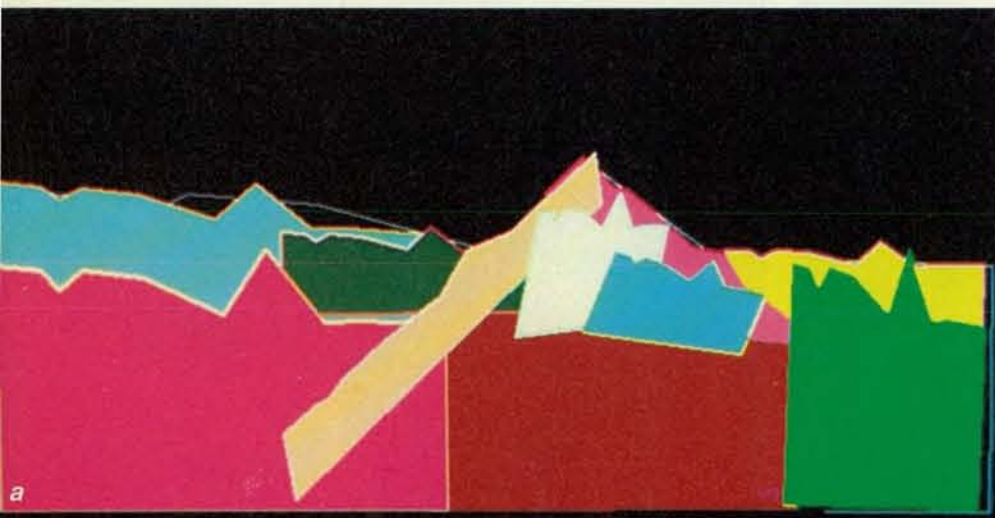
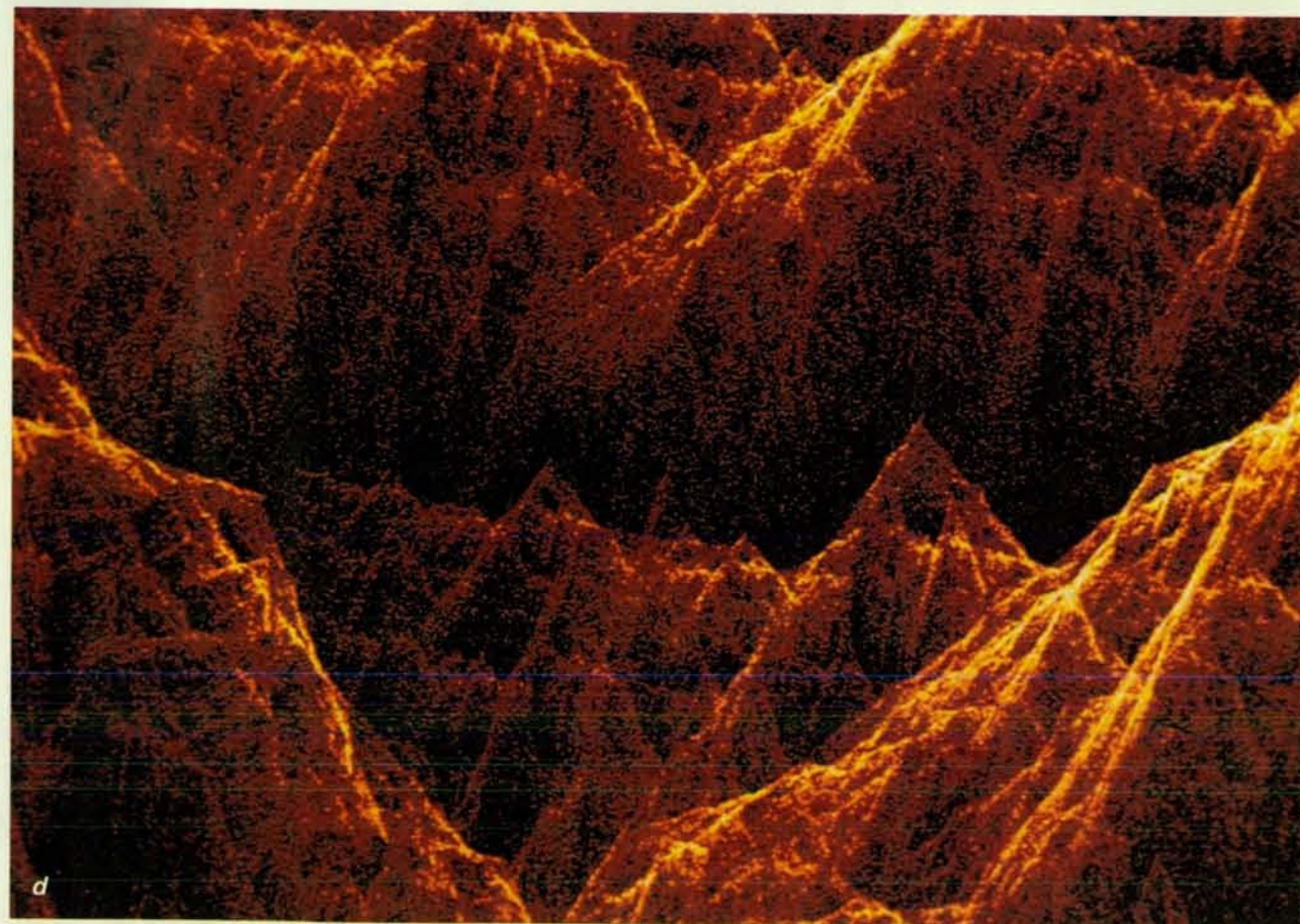
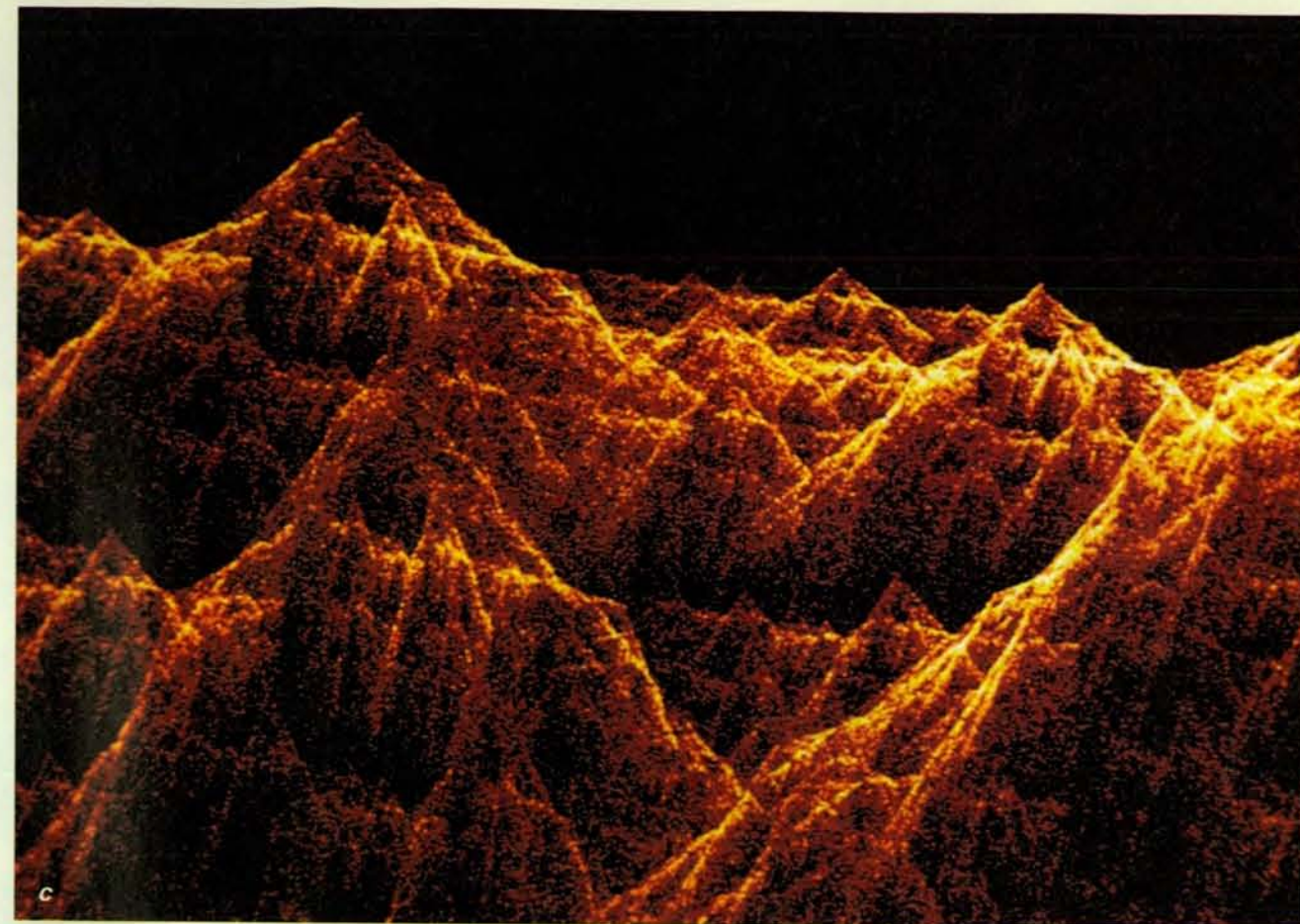
6. La quercia dall'aspetto autunnale (*b*) è stata ottenuta a partire dal collage (*a*) ideato dall'autore con la collaborazione di Luciano Corso. L'immagine può essere ingrandita (*c*, *d*) per esaminare i particolari dei rami anche da prospettive differenti. Come si può constatare, in questo caso le trasformazioni necessarie (corrispondenti alle aree di colore diverso) sono sei.

di partenza richiede però tempi troppo lunghi anche per i calcolatori più veloci. Nel caso della cattedrale, partendo dalla casetta iniziale, la prima iterazione dovrà calcolare quattro casette, la seconda 4^2, la terza 4^3 e così via. Per «perdere» l'informazione dell'immagine iniziale e arrivare all'attrattore sono necessarie almeno una ventina di iterazioni, il che significa calcolare e disegnare 4^{20} casette.

Barnsley e collaboratori proposero un algoritmo che agisce sui punti e non sulle figure. Lo chiamarono «il gioco del caos». Si parte da un punto qualunque del piano; dopo aver applicato a esso una delle trasformazioni, scelta a caso, ci troveremo in un nuovo punto. Si continua poi scegliendo sempre a caso un'ulteriore trasformazione, che viene applicata al punto appena trovato. Prima o poi (per casi normali sono di solito sufficienti una ventina di iterazioni), l'attrattore cattura il punto; o meglio, sono le contrazioni che costringono il punto a dirigersi su di esso. Una volta sull'attrattore, il punto non lo abbandona più. I nuovi punti generati apparterranno all'attrattore, del quale vedremo rapidamente formarsi l'immagine sul video. Si noti che il caso interviene qui solo in funzione strumentale: il risultato è in realtà deterministico. Come riporta James Gleick: «È esattamente come quando entriamo in una stanza che vediamo per la prima volta: i nostri occhi vagano attorno in qualche ordine, che potremmo anche considerare casuale, e noi ci facciamo una buona idea della stanza. La stanza è solo ciò che è. L'oggetto esiste indipendentemente da ciò che faccio io.»

John Elton, uno dei collaboratori di Barnsley, ha dimostrato che l'immagine è di fatto indipendente dalla particolare sequenza di punti generata, sequenza che converge comunque sull'attrattore.

È opportuno fare in modo che la frequenza con cui una trasformazione viene scelta sia approssimativamente proporzionale all'area che essa occupa sull'attrattore, così che durante il gioco del caos tutte le parti dell'attrattore si riempiano con la stessa velocità. Se il numero di punti generati è sufficientemente grande, ci aspettiamo che ogni parte dell'attrattore sia visitata. Ciò ha portato all'idea di associare a ogni trasformazione una probabilità. Si ottiene così un codice che possiamo chiamare *codice con probabilità*.

Se in alcune zone del collage vi sono sovrapposizioni, come per esempio nella foglia, nella quercia o nel paesaggio montano, vi saranno sull'attrattore punti visitati più spesso di altri nel corso del gioco del caos. Si può ritenere che in tali punti sia concentrata più «massa», ovvero che vi sia, per così dire, una densità maggiore. Scelte diverse delle probabilità associate alle trasformazioni danno origine a distribuzioni diverse della densità dei punti, che si manifestano in una differente resa delle immagini, a volte anche in misura sorpren-

7. Le montagne (*b*), ottenute dal collage (*a*) approntato dall'autore, rivelano, negli ingrandimenti (*c*, *d*), una successione di picchi e valli. Come si vede, in tutte le scale di grandezza viene conservato lo stesso grado di complessità. In *c* è ingrandita la zona a sinistra della montagna più alta, in *d* la «valle» centrale.

Per accordi con
la ZANICHELLI EDITORE S.p.A.
siamo lieti di offrire ai lettori
de LE SCIENZE, a prezzi speciali,
i volumi della collana
NUOVI CLASSICI DELLA SCIENZA
edizione italiana
della "Scientific American Library"

I FOSSILI E LA STORIA DELLA VITA
di George Gaylord Simpson
(L. 35.500)

LA SCOPERTA
DELLE PARTICELLE SUBATOMICHE
di Steven Weinberg
(L. 31.500)

POTENZE DI DIECI
di Philip e Phylis Morrison
(L. 35.500)

LA DIVERSITÀ UMANA
di Richard Lewontin
(L. 31.500)

LA SCIENZA DEL SUONO
di John R. Pierce
(L. 31.500)

IL SECONDO PRINCIPIO
di Peter W. Atkins
(L. 31.500)

L'EREDITÀ DI EINSTEIN
di Julian Schwinger
(L. 33.500)

IL SISTEMA SOLARE
di Roman Smoluchowski
(L. 35.500)

OCCHIO, CERVELLO E VISIONE
di David H. Hubel
(L. 35.500)

FARMACI, DROGHE E CERVELLO
di Solomon H. Snyder
(L. 35.500)

SABBIA
di Raymond Siever
(L. 35.500)

DIMENSIONI E VITA
di Thomas A. McMahon e John Tyler Bonner
(L. 34.500)

STRUTTURE SOTTO SFORZO
di James E. Gordon
(L. 35.500)

DAI QUARK AL COSMO
di Leon M. Lederman e David N. Schramm
(L. 35.500)

Per approfittare di questa occasione
utilizzare la cedola "ordine per libri"
allegata alla rivista.

dente, pur rimanendo inalterata la geometria dell'attrattore. Anche se quest'ultima non dipende dalle probabilità, è chiaro che se qualche valore è troppo piccolo, occorrerà un tempo superiore prima che il gioco del caos saturi interamente l'immagine.

Zone più o meno dense, con differente concentrazione di massa all'interno dell'immagine, rivelano ombreggiature, tessiture, giochi di chiaro-scuro. Ogni codice con probabilità produce un'unica distribuzione di densità sull'attrattore che al termine del gioco del caos rende l'immagine unica, imprimendole un carattere di individualità che è responsabile della sua bellezza. È questo forse l'aspetto più affascinante della progettazione di una figura frattale. In effetti, tale densità si rivela essa stessa frattale e per essa i matematici dispongono di un corrispettivo ben preciso, quello di *misura*. Sono misure, determinate univocamente da codici con probabilità, i veri frattali, mentre gli attrattori sono semplicemente gli insiemi su cui i frattali vivono. Nel codice, la struttura dell'attrattore è controllata dalle trasformazioni che ne fissano la geometria. La misura è individuata dalle probabilità, che danno vita alla resa dell'immagine, agendo sulla sua percezione e facendola appartenere, a buon diritto, a un mondo ai confini fra l'arte e la matematica.

Ecco quindi che, giocando con le probabilità, la quercia si trasforma e, acquisendo il fogliame, assume un aspetto primaverile.

E i colori? Sono una manifestazione visiva della misura sull'attrattore. Essa viene resa visualizzando con toni di grigio o colori differenziati zone a diversa densità. Quando, alla fine del gioco del caos, l'immagine è interamente calcolata e il programma esegue la fase di resa cromatica, spesso l'immagine si trasforma, da piatta acquisisce sostanza, volume, dandoci una sensazione di profondità. È quello che succede, per esempio, nel caso del paesaggio montano (*si veda l'illustrazione 7*).

Le immagini così ottenute hanno la proprietà di essere invarianti in scala. Qualunque sia l'ingrandimento che otteniamo con il gioco del caos, esse presentano lo stesso grado di complessità; i contorni frastagliati non li vedremo mai diventare lisci. È questo un fatto caratteristico degli oggetti frattali che rivela come essi non siano caratterizzabili in termini di metrica euclidea (in quanto non è possibile assegnare loro una dimensione intera), né in termini di analisi matematica (che si occupa di funzioni differenziabili i cui grafici, una volta sufficientemente ingranditi, si comportano localmente come segmenti di linee rette). È sorprendente pensare che lo stesso piccolo insieme di informazioni contenute nel codice individui il modello di un oggetto che può essere osservato a differenti scale senza perdere risoluzione. I particolari, una volta ingranditi, riveleranno a loro volta dettagli insospettati. Ciò indica, una volta di più, l'adeguatezza del metodo a descrivere oggetti della natura.

Nelle illustrazioni 6c e 6d osserviamo ingrandimenti di due diversi particolari della quercia, mentre nelle illustrazioni 7c e 7d si possono individuare due ingrandimenti successivi del paesaggio montano. Si vede, in particolare, che è possibile ottenere codifiche di immagini non necessariamente autosimili. In zone osservate a forte ingrandimento non appaiono cioè copie dell'immagine intera.

Un'altra interessante applicazione è la possibilità di realizzare animazioni, in virtù di un'importante proprietà di continuità dell'insieme delle trasformazioni che generano l'attrattore. Piccole variazioni nel codice dell'immagine producono figure dall'aspetto molto «vicino». Così, per esempio, opportune leggere modificazioni nel collage della quercia originano lo stesso albero che appare con la fronda lievemente spostata. Lavorando in questo senso l'autore ha ottenuto diverse immagini, veri e propri fotogrammi che, inseriti in un programma appropriato di animazione, quasi fosse un proiettore algoritmico, mostrano la quercia mossa dal vento (o, volendo, in balia di un uragano).

Un buon calcolatore personale orientato alle elaborazioni grafiche impiega, per il calcolo e la resa cromatica di un'immagine complessa come quella del paesaggio montano, circa un minuto, un tempo relativamente breve se si pensa alla quantità di calcoli che il gioco del caos comporta. (Per le illustrazioni è stato utilizzato un Commodore Amiga 3000 in configurazione standard, con software progettato dall'autore.) Forti ingrandimenti, come quello dell'illustrazione 7d richiedono circa una ventina di minuti. La natura elettivamente parallela dell'algoritmo «gioco del caos» si presta, infine, a implementazioni su calcolatori a più processori, consentendo di ridurre di molto i tempi di elaborazione.

BIBLIOGRAFIA

BARNSLEY MICHAEL, *Making Chaotic Dynamical Systems to Order* in *Chaotic Dynamics and Fractals*, Academic Press, Londra, 1986.

BARNSLEY MICHAEL, *Fractals Everywhere*, Academic Press, Londra, 1988.

PEITGEN HEINZ-OTTO e SAUPE DIETMAR, *The Science of Fractal Images*, Springer-Verlag, Berlino, 1988.

GLEICK JAMES, *Caos. La nascita di una nuova scienza*, Rizzoli, Milano, 1989.

EDGAR GERALD A., *Measure, Topology and Fractal Geometry*, Springer-Verlag, New York, 1990.

CASATI GIULIO (a cura), *Il caos*, Le Scienze, Milano, 1991.

La domesticazione del cavallo da sella

Questa innovazione, che influì notevolmente sull'evoluzione culturale e linguistica, risale a ben 6000 anni fa, come dimostrano i segni di usura da morso riscontrati in reperti di denti di cavallo trovati in Ucraina

di David Anthony, Dimitri Y. Telegin e Dorcas Brown

Il giorno in cui un uomo balzò per la prima volta sul dorso di un cavallo e si guardò intorno da quella posizione sopraelevata il corso della storia cambiò radicalmente. Un appassionato di cavalli francese osservò una volta, solo un po' enfaticamente, che l'uomo, minacciato dagli elementi naturali che cospirano per distruggerlo e da animali più robusti e veloci di lui, sarebbe stato uno schiavo se il cavallo non lo avesse reso re.

Si è generalmente supposto che l'impiego del cavallo come animale da sella abbia avuto inizio nell'Asia centrale solo cinque secoli circa prima della comparsa della cavalleria negli eserciti del Medio Oriente, verso il 1000 a.C. Tuttavia questa opinione è erronea: nuovi dati, che si basano sull'usura dentaria causata dal morso in un cavallo preistorico, indicano che l'uso di questo animale come cavalcatura è molto più antico. La storica alleanza tra cavallo e cavaliere ebbe origine nell'Età del rame, in seno alla cosiddetta cultura di Sredni Stog che fiorì in Ucraina 6000 anni fa. L'impiego del cavallo da sella ha quindi preceduto quello della ruota, il che ne fa la prima innovazione significativa nella storia dei trasporti terrestri. Inoltre la sua datazione e collocazione geografica danno sostegno alla ben nota teoria secondo la quale cavalieri originari delle steppe dell'Eurasia avrebbero contribuito alla diffusione della famiglia delle lingue indoeuropee, quella che oggi è la più diffusa del mondo.

Prima del 4300 a.C. circa i cavalli si trovavano esclusivamente allo stato selvatico ed erano diffusi nella vasta fascia di steppe erbose e pianeggianti che si estende dall'Ucraina verso est, fino alla catena dei Tien Shan e alla Mongolia. Piccole popolazioni di cavalli vivevano anche nell'Europa centrale e occidentale, ma questi animali erano importanti per l'alimentazione umana solo nella regione delle steppe, dove senza dubbio formavano grandi branchi. Come i bisonti dell'America Settentrionale, i cavalli erano i più numerosi fra i grandi erbivori delle steppe.

I cavalli dei quali si sono rinvenuti i resti in vari siti preistorici potevano costituire selvaggina, animali domestici da carne o cavalcature. Per trovare un metodo che consentisse di distinguere tra questi diversi impieghi si sono studiate due popolazioni attuali di cavalli selvatici. Joel Berger dell'Università del Nevada si è occupato dei mustang della Granite Range nel Nevada, mentre Ronald R. Keiper della Pennsylvania State University e Daniel I. Rubenstein della Princeton University hanno studiato i pony delle isole di barriera della Eastern Shore, al largo della costa della Virginia e del Maryland; entrambi i gruppi di ricerca hanno trovato che in natura i cavalli formano due unità sociali principali: branchi di giovani maschi privi di compagne e harem di femmine con i puledri sotto la guida di uno stallone.

I giovani maschi si spostano imprevedibilmente in un vasto territorio mentre gli stalloni e i loro harem tendono a seguire percorsi abituali, dando così origine a piste contrassegnate da escrementi che possono aver facilitato i cacciatori nell'inseguimento di questi branchi.

I resti di cavalli abbattuti dai cacciatori dovrebbero perciò comprendere soprattutto ossa di giumente adulte e di individui subadulti. Invece fra i cavalli domestici abbattuti per la carne dovrebbe esservi una proporzione più elevata di giovani maschi, che sono riottosi e spesso non necessari per l'incremento numerico del branco.

Le strutture ossee legate al sesso e all'età riscontrabili nei resti di cavalli abbattuti dalle popolazioni dell'Età del rame dovrebbero perciò indicare se questi animali erano selvatici o domestici. Purtroppo la determinazione del sesso di un cavallo a partire dallo scheletro è spesso impossibile, in quanto dipende dalla conservazione dei denti superiori o inferiori, che nei maschi includono i canini (normalmente assenti nelle femmine). Ma dato che la mascella del cavallo è una parte difficilmente commestibile, se ne trova un numero relativamente piccolo fra gli scarti di cucina che costituiscono il grosso dei materiali recuperati in un sito archeologico. I tentativi di individuare i primi cavalli domestici si sono basati di conseguenza su caratteri diversi dal sesso, soprattutto sulle misure craniche e sulle dimensioni della parte inferiore degli arti, nessuno dei quali però può fornire prove definitive dell'avvenuta domesticazione.

Il sito archeologico più importante per lo studio della domesticazione del cavallo è Dereivka, un villaggio scavato da uno di noi (Telegin) fra il 1960 e il 1967 e poi di nuovo nel 1983. Il sito, uno tra le centinaia di siti attribuiti alla cultura ucraina di Sredni Stog, risalente all'Età del rame, si trova circa 250 chilometri a sud di Kiev sulla sponda occidentale del Dnepr, in una zona ecologica di transizione fra la steppa boscosa a nord e la steppa vera e propria a sud. La cultura di Sredni Stog, così detta da un'isola del Dnepr dove fu scavato il primo sito di questo tipo, è datata fra il 4300 e il 3500 a.C. Quattro datazioni al radiocarbonio effettuate su campioni provenienti da Dereivka indicano che il villaggio fu occupato intorno al 4000 a.C., con un margine di errore di alcuni secoli.

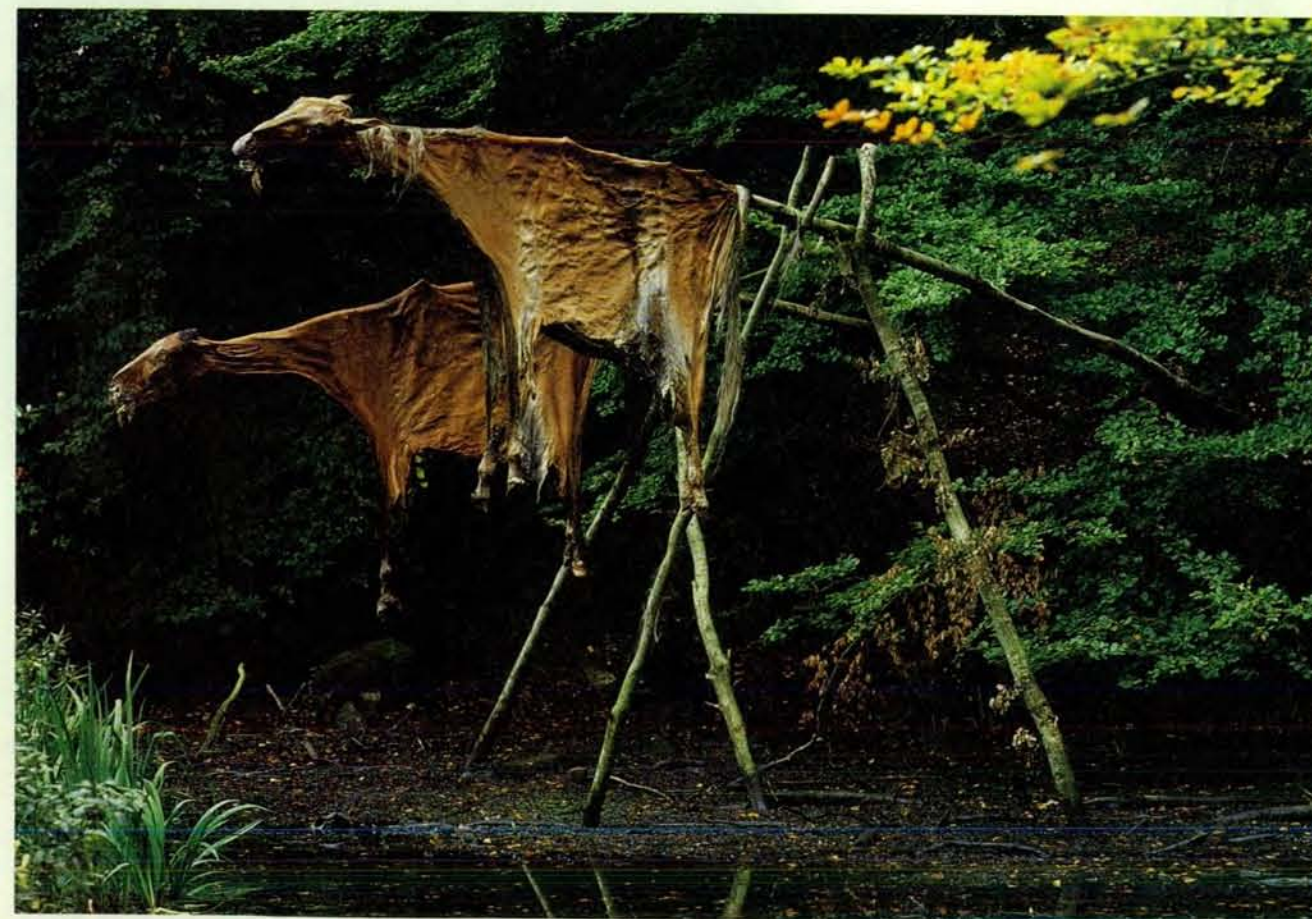
Il ritrovamento di mole di pietra e di falcetti di selce dimostra che la popolazione di Sredni Stog praticava l'agricoltura, e l'abbondanza di ossa di bovini, ovini e suini fa pensare che si dedicasse anche all'allevamento; tuttavia sono i cavalli a caratterizzare questa cultura dal punto di vista economico.

Tra i resti alimentari dei siti appartenenti alla cultura di Sredni Stog, le ossa di cavallo sono presenti in percentuale circa doppia rispetto a quanto si osserva per culture più antiche della stessa regione. Oltre a dipendere maggiormente dal cavallo per l'alimentazione, la popolazione di Sredni Stog ha lasciato testimonianze della presenza di questo equino in siti posti più a nord, all'interno di bacini ricchi d'acqua e in prevalenza boscosi che non costituiscono l'habitat usuale dei cavalli selvatici; è chiaro che gli animali sono stati portati sul luogo.

L'abbondante consumo di carne di cavallo fa pensare che questo animale sia stato addomesticato come fonte di cibo dalla popolazione di Sredni Stog. Di fatto sarebbe stato una risorsa alimentare molto conveniente: al contrario degli ovini e dei bovini, i cavalli sono originari della regione, quindi richiedono meno cure, specie nei rigidi mesi invernali. Così, disponendo di cavalli rinchiusi in un recinto, a qualcuno deve essere venuta l'idea di saltare loro in groppa.

A Dereivka è stata rinvenuta un'ampia documentazione di questa tendenza verso uno sfruttamento più intensivo del cavallo. Le 2412 ossa equine rinvenute nei cumuli di rifiuti (probabilmente depositatisi nel corso di diverse rioccupazioni del sito) costituiscono il 61,2 per cento di tutte le ossa identificabili di animali e rappresentano almeno 52 capi - quasi certamente molti di più - per un totale di circa 7500 chilogrammi di carne. Questa quantità assommerebbe al 60 per cento del peso in carne di tutti gli animali trovati nel sito.

La determinazione del sesso è stata possibile solo per sei frammenti di mandibola, che appartenevano tutti ad animali maschi; questa osservazione fa pensare che quasi tutti i cavalli i cui resti sono stati rinvenuti a Dereivka - o almeno una sorprendente maggioranza - fossero maschi. Sappiamo che in un gruppo costituito da uno stallone e dal suo harem i maschi sono solo il 30 per cento circa, inclusi gli individui molto giovani, e che il prelievo casuale da una popolazione allo stato selvatico darebbe poco meno del 50 per cento di maschi. Sembra perciò che gli animali abbattuti siano stati scelti in un branco di cavalli addomesticati. D'altra parte, un'analisi recente dell'età dei cavalli di Dereivka indica che per lo più essi sono stati uccisi fra i sei e gli otto anni, ossia a un'età più avanzata di quanto ci si aspetterebbe se la scelta dei capi da abbattere fosse stata compiuta su un branco comprendente molti giovani maschi. Si può quindi supporre che il sito contenga i resti di cavalli sia domestici sia selvatici.

Il ritrovamento più notevole è stato quello di un cavallo cui era stata dedicata un'attenzione tutta particolare: si tratta di uno stallone di sette od otto anni di cui si sono trovati il cranio e l'arto anteriore sinistro in un deposito di significato rituale, insieme ai resti in connessione anatomica di due cani. Sembra che le pelli dei tre animali, complete della testa e delle ossa degli arti anteriori o della colonna vertebrale, siano state riunite intenzionalmente. Nei pressi si è rinvenuta una figurina di argilla a forma di cinghiale, insieme a frammenti di altre figure che sembrano rappresentare esseri umani. Vi erano anche due pezzi

Queste pelli di cavallo appese a pali fanno parte di una ricostruzione realizzata in Danimarca di un rito ampiamente documentato nell'Europa precristiana. I resti di uno stallone, ritrovati insieme a quelli di due cani in un sito ucraino risalente a 6000 anni fa, in condizioni che fanno pensare a un rito analogo, mostrano tracce di usura dentaria provocata dal morso; questo animale rappresenterebbe quindi la più antica cavalcatura conosciuta al mondo. Il complesso ricorda alcuni miti indoeuropei nei quali è un cavallo a trasportare le anime dei defunti alle porte dell'aldilà, dove i cani montano la guardia.

La domesticazione del cavallo non è attestata con certezza da manufatti dell'Età del rame, come questo «scettro» a forma di testa equina (*in alto a sinistra*) rinvenuto a Drama in Bulgaria. La prima testimonianza certa è data da una incisione rupestre dell'Età del bronzo raffigurante un cavallo e un cavaliere (*in basso a sinistra*) che si trova a Kammenaja Mogila in Ucraina.

Le popolazioni che utilizzavano il cavallo come animale da sella si diffusero rapidamente verso oriente in steppe non ancora abitate, ma occorse loro più tempo per addentrarsi nelle regioni a occidente, già occupate da insediamenti. Bighe trainate da cavalli raggiunsero il Medio Oriente intorno al 1800 a.C., circa 2000 anni dopo la domesticazione del cavallo da sella.

di corno perforati che potevano essere dei reggimorso.

L'intero complesso è un deposito di significato cultuale: il fatto che il cavallo si trovi associato a cani e a figurine antropomorfe indica chiaramente che esso era addomesticato. L'usanza rituale in cui una pelle di cavallo completa di testa e zampe viene esposta su un palo per contrassegnare un sito sacro è ampiamente documentata nell'Europa precristiana. Il rito veniva praticato ancora in questo secolo dai buriati e dagli oirati, due popolazioni che vivono fra i Monti Altai e il Lago Bajkal, ed è possibile che si conservi a tutt'oggi.

Lo stallone di Dereivka risale con certezza all'epoca della cultura di Sredni Stog. È stato rinvenuto su un piano di calpestio relativo all'Età del rame, dove cadde o venne posato per essere poi ricoperto da rifiuti attribuibili alla cultura di Sredni Stog. I particolari della scoperta sono in accordo con l'ipotesi che la pelle e il cranio dello stallone fossero stati esposti in cima a un palo come offerta a scopo propiziatorio e rendono assai improbabile la possibilità che i suoi resti provengano da una buca scavata all'interno del deposito da abitanti di epoca posteriore.

I reggimorso di corno - se proprio di questo si tratta - sono simili ad altri esemplari che sono stati citati a riprova del fatto che nell'Età del rame il cavallo veniva impiegato come animale da sella. Fra questi vi è una coppia di reggimorso proveniente da una tomba della cultura di Sredni Stog rinvenuta ad Aleksandrija (e priva di resti equini); alcuni sono stati ritrovati anche in siti coevi della Polonia e della parte orientale della Germania. Tuttavia, benché reggimorso di corno molto simili siano stati certamente usati 2000 anni dopo in finimenti dell'Età del bronzo, questi esemplari dell'Età del rame non forniscono una prova assoluta dell'impiego del cavallo come animale da sella.

Un altro gruppo di reperti significativi, analizzati in dettaglio da uno di noi (Telegin), è costituito dalle teste di mazza in pietra levigata che sono state ritrovate in un gran numero di siti della tarda Età del rame nelle steppe e nelle regioni adiacenti dell'Europa sudorientale. Sembra che le mazze più antiche non siano decorate con figure di animali, mentre gli esemplari posteriori, risalenti al 3500-3000 a.C., sono lavorati in modo da rappresentare teste di cavallo, riproducendo a volte anche le cinghie e i finimenti. Questi oggetti più tardi sembrano associati alla cultura di Yamna, successiva a quella di Sredni Stog, e combinano l'immagine del cavallo con un simbolo di ricchezza, essendo fatti per lo più con una pietra importata, il porfido. La mazza in sé rappresenta anche la potenza militare. Nessun altro animale è stato oggetto di analoghe raffigurazioni nell'Età del rame in Europa, e tuttavia le mazze non dimostrano l'impiego del cavallo come animale da sella.

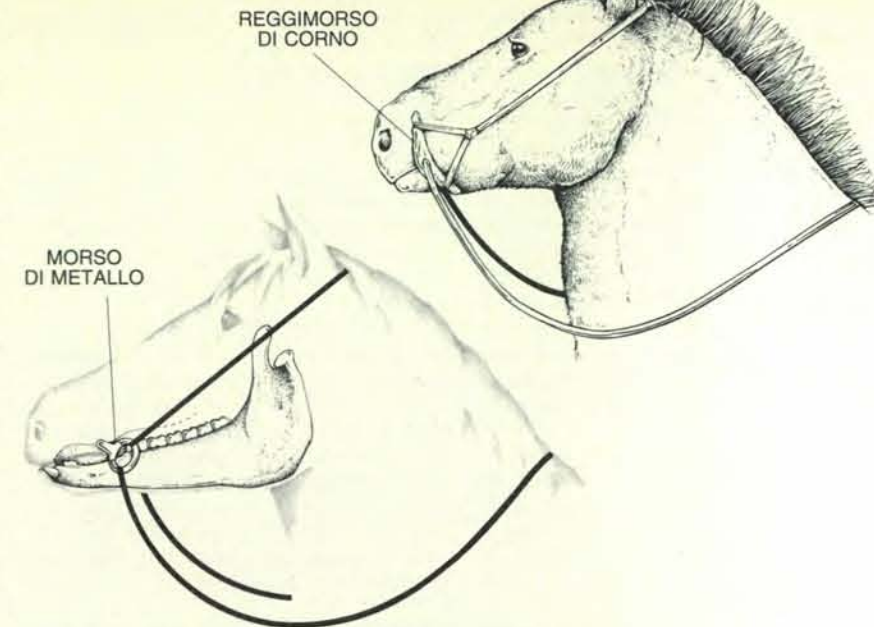
Poiché i manufatti non erano in grado di far luce sul nostro problema, abbiamo deciso di dedicarci all'esame dei resti ossei. Abbiamo supposto che, se i primi cavalli da sella portavano il morso, sia pure fatto di corda, i premolari avrebbero dovuto recare tracce microscopiche di usura. Questa ipotesi iniziale è stata accolta con scetticismo da diversi veterinari, i quali ci hanno fatto notare che il morso dovrebbe idealmente poggiare sulle zone più delicate della bocca del cavallo, dove un leggero strappo delle redini basta per provocare notevole fastidio all'animale ed esercitare così un preciso controllo su di esso. Un morso ben posizionato dovrebbe essere a contatto con la lingua e le gengive, inserendosi nello spazio (detto barra) fra gli incisivi e i premolari.

Tuttavia, come abbiamo appreso da alcuni allevatori di cavalli, il morso non è portato sempre nella posizione ideale. Questa osservazione empirica è stata confermata da immagini radioscopiche di cavalli che mordevano il morso ottenute da Hilary M. Clayton dell'Università del Saskatchewan. Nelle immagini si nota che, se il morso non è posizionato perfettamente, il cavallo può spostarlo contro i premolari anteriori alzando e ritraendo la lingua. Gli angoli della bocca dell'animale sono in posizione anteriore rispetto ai premolari così da costringerlo a spingere fortemente il morso contro le parti guanciali e afferrarlo con i premolari per impedire che scivoli in avanti a contatto delle gengive.

Un cavallo che per abitudine si ribella al morso lo sposta quindi ripetutamente contro il margine della superficie di occlusione (ossia di masticazione) dei premolari anteriori, dove la precarietà della stretta fa sì che il morso scivoli sopra il bordo del dente. La forza enorme con cui il cavallo stringe il morso fra i denti e la tendenza di quest'ultimo a scorrere avanti e indietro sul bordo anteriore del dente provocano usura.

Due di noi (Anthony e Brown) hanno esaminato i premolari inferiori di 10 cavalli domestici attuali sottoposti al morso e di 20 cavalli selvatici del Nevada e delle isole di barriera della Virginia, i quali non avevano mai portato il morso. Al microscopio elettronico a scansione i danni provocati dal morso erano facilmente distinguibili da quelli causati dall'usura naturale della superficie di occlusione. I danni prodotti dal morso sono caratteristici per diversi aspetti. In primo luogo la posizione è costante: lo smalto della superficie della prima cuspide in contatto con il morso è scalfito sui lati buccale e linguale nonché sul margine anteriore del dente. Inoltre le tracce di usura hanno un andamento caratteristico, con piccole fratture che si irradiano dal centro dei rilievi dello smalto e talvolta si uniscono a formare nette spaccature che decorrono lungo tutta la cresta. In terzo luogo, lo scorrimento in avanti e all'indietro del morso sullo smalto danneggiato produce aree irregolari (fratture «a gradino» abrase) all'interno delle fratture principali. Infine la prima cuspide è spesso smussata verso la parte anteriore della bocca.

Nei cavalli attuali che portano i segni microscopici dell'usura da morso il margine anteriore del premolare mostra un arretramento medio di 3,56 millimetri, mentre nei premolari dei cavalli selvatici il valore medio è di soli 0,82 millimetri. Oltre a ciò, lo smalto della superficie di occlusione di questi ultimi è in genere molto liscio, completamente privo degli evidenti solchi che ricoprono la prima cuspide nei denti dei cavalli sottoposti al morso. In circa un terzo dei cavalli selvatici si osservano fratture dello smalto sul lato buccale della prima cuspide, ma non su quello linguale. (Nei cavalli i danni al lato buccale del dente sono il risultato naturale della masticazione.) Anche in questi casi non si sono mai riscontrate in cavalli selvatici alterazioni dentarie che potessero essere scambiate per usura da morso.

Forti di queste conoscenze, due di noi (Anthony e Brown) si recarono a Kiev su invito dell'Accademia delle

La ricostruzione dello stallone di Dereivka (*in alto*) lo mostra come un animale dal capo piuttosto grande, munito di un morso di corda con reggimorso di corno. Il morso impiegato sui cavalli attuali (*in basso*) dovrebbe idealmente poggiare sulle parti morbide della bocca, ma gli animali tendono a spostarlo contro i premolari.

Il confronto fra i premolari di un cavallo selvatico (*in alto*) e quelli dello stallone di Dereivka (*in basso*) dimostra che i primi hanno un profilo non alterato e presentano fratture solo sul lato buccale della superficie masticatoria (*nella microfotografia*), mentre i secondi sono smussati e coperti di fratture, a riprova dell'uso del morso.

scienze ucraina per studiare, in collaborazione con Telegin e con l'archeozoologa Natalja Belan-Timčenko, i denti di un vasto campione di cavalli preistorici. Abbiamo realizzato calchi estremamente dettagliati di premolari inferiori equini rinvenuti in siti la cui datazione va da 25 000 a 1000 anni fa. L'analisi dei calchi, effettuata in seguito negli Stati Uniti, ha indicato che i denti databili a un'epoca anteriore al 4000 a.C. non presentano segni di smussatura o tracce microscopiche di usura da morso. Nello stallone di Dereivka, tuttavia, i premolari anteriori appaiono smussati, con un arretramento di 3,5 millimetri che corrisponde quasi esattamente all'arretramento medio dei premolari dei cavalli domestici del nostro gruppo di controllo ed è ben lontano dalla misura di 0,82 millimetri osservata nei cavalli selvatici.

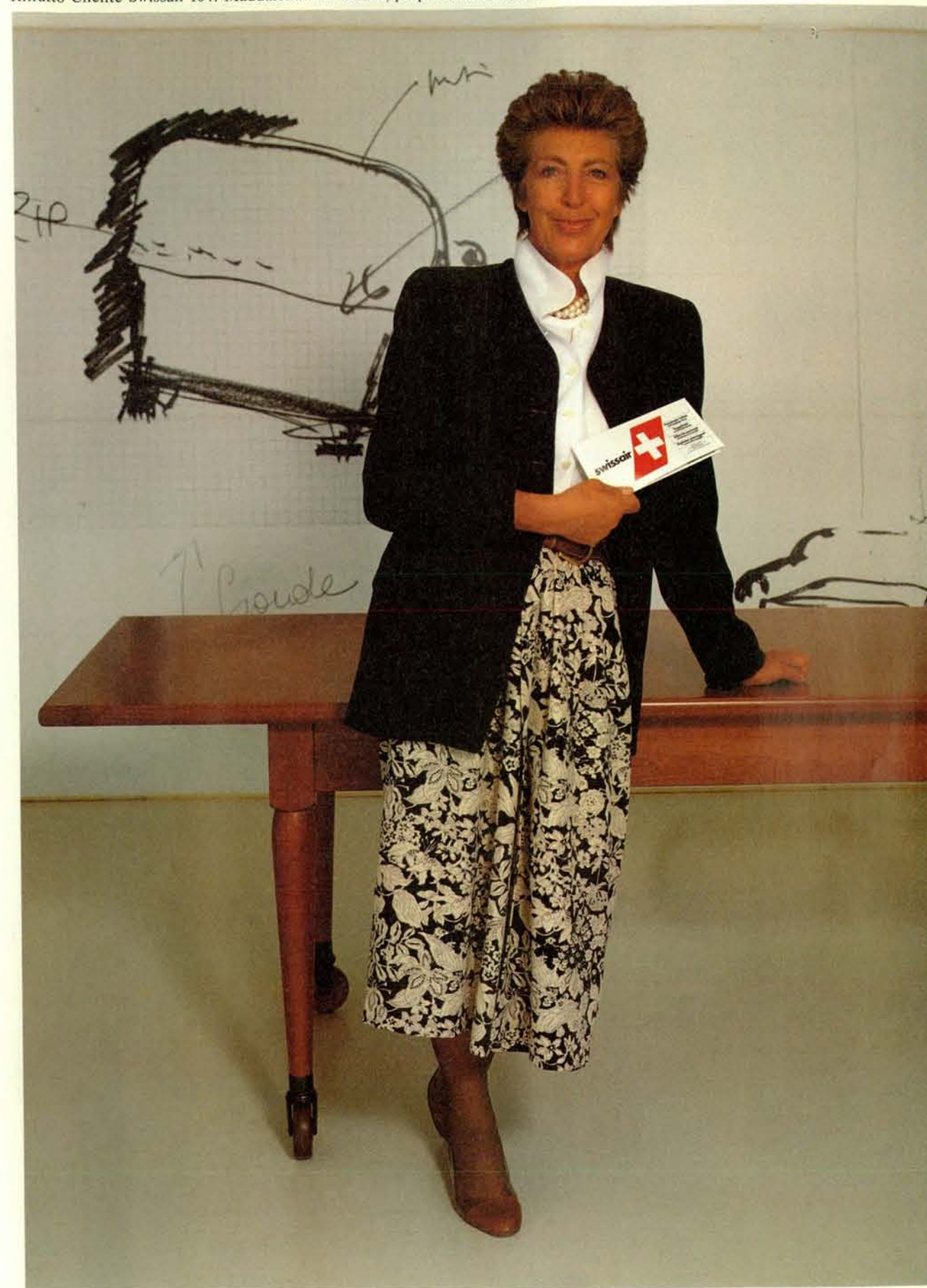
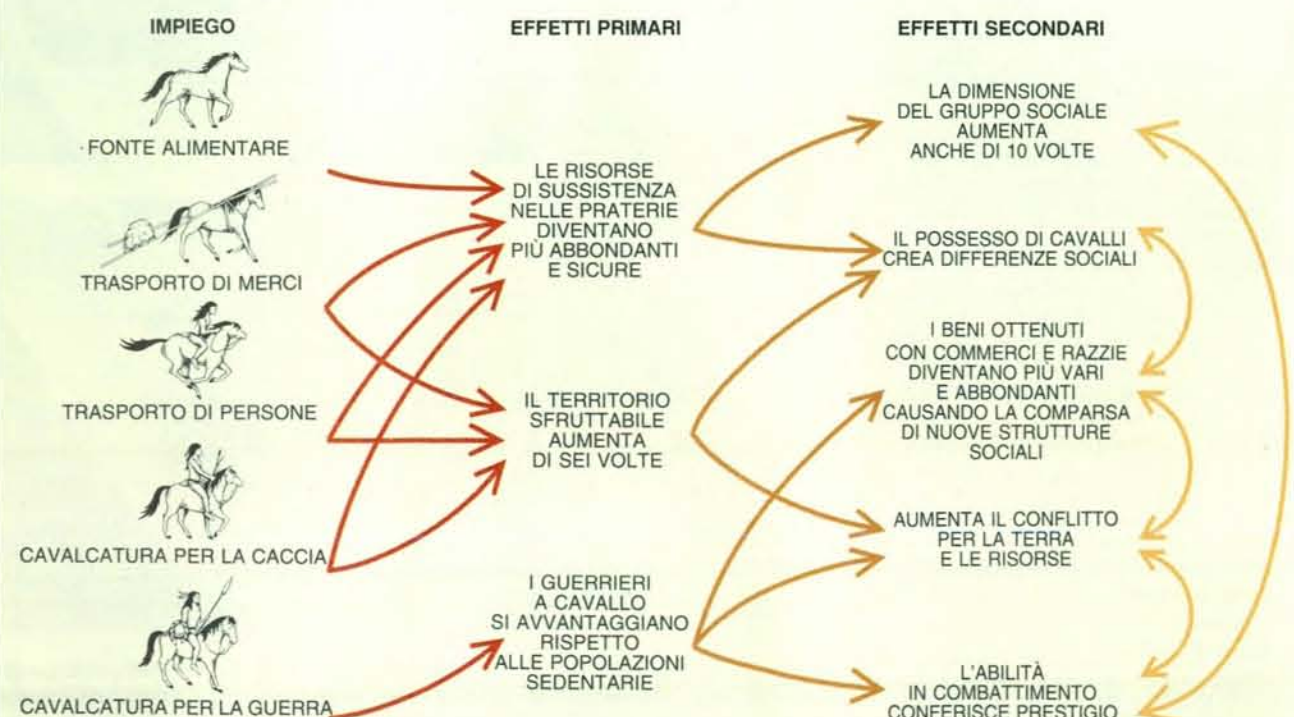
Quando abbiamo esaminato al microscopio elettronico a scansione i calchi dei premolari dello stallone di Dereivka, abbiamo potuto osservare tutti i segni microscopici dell'usura da morso. Una netta smussatura, fratture che hanno origine nel centro dei rilievi dello smalto e fratture a gradino abrase erano ben evidenti su tutta la superficie della prima cuspide. L'usura si limitava all'area smussata e non si estendeva alla porzione posteriore del dente. Oltre a ciò, a causa delle particolari modalità di deposizione dello stallone di Dereivka, se ne è conservata anche la mascella superiore; facendola combaciare con quella inferiore, si è visto che l'usura non poteva essere spiegata da una malocclusione. È quindi chiaro che lo stallone portava il morso, il che significa che doveva essere guidato dal retro, ossia da un cavaliere o dal conducente di un veicolo munito di ruote. Cinquecento anni prima dell'invenzione della ruota, si può tranquillamente scartare la seconda ipotesi; lo stallone di Dereivka è dunque il più antico cavallo da sella conosciuto nel mondo.

Stranamente nessuno degli altri quattro premolari inferiori equini rinvenuti a Dereivka mostra tracce evidenti di usura da morso. Questi denti sono stati ritrovati in mezzo agli scarti di cucina del sito e probabilmente provengono da cavalli abbattuti a scopo alimentare. L'animale prescelto per essere incluso nel deposito rituale insieme ai due cani è il solo a essere stato verosimilmente impiegato come cavalcatura.

Abbiamo tentato non solo di datare l'uso del cavallo come animale da sella, ma anche di determinarne gli effetti sulle culture della tarda Età del rame in Europa, fra il 4000 e il 3000 a.C. circa. Diversi studiosi, in particolare Andrew Sherratt dell'Ashmolean Museum dell'Università di Oxford e Sandor Bökönyi dell'Accademia delle scienze ungherese, hanno avanzato l'ipotesi che profondi cambiamenti sociali ed economici siano stati provocati dall'impiego di animali per ottenere beni quali lana e prodotti caseari e per il trasporto di persone e merci. Se l'uso di cavalcature precedette quello di veicoli dotati di ruote, i suoi effetti dovrebbero essere distinguibili da quelli causati dalla trazione animale.

Le modificazioni culturali documentate nel Nuovo Mondo forniscono un modello per ricostruire l'impatto avuto dall'impiego di cavalcature in Ucraina durante l'Età del rame. I cavalli potrebbero essere stati fra le prime «importazioni» europee a giungere nell'America Settentrionale, a opera dei colonizzatori spagnoli che li introdussero nel Nuovo Messico alla fine del XVII secolo. Alcuni di questi animali potrebbero essere tornati allo stato selvatico o essere stati oggetto di scambio fra diverse popolazioni indigene, finendo così per raggiungere la zona centrale del continente. È certo che le tribù stanziate in questa regione iniziarono a impiegare cavalcature molto prima di venire a contatto con le armi da fuoco, le malattie europee, le nuove merci e altri aspetti della vita dei colonizzatori. Gli effetti di questa innovazione possono quindi essere esaminati in maniera almeno parzialmente indipendente da altre influenze europee nel periodo che va dal 1680 al 1750.

L'acquisizione dei cavalli rivoluzionò pressoché tutti gli aspetti della vita nella regione corrispondente alle attuali Great Plains. Un cavaliere può muoversi da due a tre volte più velocemente e coprire in un giorno una distanza da due a tre

Ritratto Cliente Swissair 104: Maddalena De Padova, proprietaria di una azienda di mobili di design, Milano.
swissair

La posizione scorretta del morso è evidente in questa fotografia di cavalieri afghani. I cavalli tendono a spostare il morso contro i premolari per evitare che prema sulle parti molli della bocca, provocando così la comparsa di segni caratteristici sui denti.

volte superiore rispetto a un individuo a piedi. Questo fatto rendeva improvvisamente raggiungibili risorse, alleati, nemici e mercati che prima erano troppo distanti. Le possibilità di sopravvivenza nelle aride praterie, che erano sempre state precarie per popolazioni di cacciatori costrette a muoversi a piedi, divennero più facili e sicure. I villaggi di agricoltori sedentari i cui insediamenti nelle valli fluviali erano centri di popolamento e di produttività economica divennero vulnerabili a incursioni fulminee di nemici a cavallo che erano pressoché al sicuro da inseguimenti e azioni punitive. Molti di questi villaggi furono abbandonati e i loro abitanti divennero cacciatori a cavallo per autodifesa, come accadde ai Cheyenne, agli Arapaho e ai Crow.

Le azioni belliche aumentarono di intensità e assunsero una maggiore importanza sociale, sia perché i cavalli divennero un simbolo di ricchezza di cui era facile appropriarsi, sia perché il possesso di cavalcature spinse a ridefinire i confini fra tribù che erano stati stabiliti in base a distanze percorribili a piedi. I sistemi di commercio e scambio si fecero più complessi ed estesi e interessarono un volume di beni (cavalli inclusi) maggiore di quanto fosse possibile in precedenza. Trasformazioni simili avvennero indipendentemente anche nell'America Meridionale.

Analoghi cambiamenti sembrano essersi verificati anche all'epoca della cultura di Sredni Stog, che è oggi ben conosciuta grazie agli scavi compiuti in oltre 200 siti delle valli steppose dell'Ucraina. Gli insediamenti comprendevano un piccolo numero di abitazioni semipermanenti, in materiale da costruzione leggero, dove vivevano probabilmente gruppi familiari allargati che si dedicavano alla caccia, alla pesca, all'agricoltura e alla sorveglianza degli armenti o delle greggi, forse servendosi di cavalli come animali da sella. I morti venivano sepolti in piccole necropoli di 10-30 tombe, con un corredo funebre ridotto per lo più a un paio di semplici utensili. Alcune tombe però contenevano ornamenti in rame, perline di conchiglie e pregiati utensili di selce, a riprova del fatto che si andava costituendo una stratificazione sociale.

È logico attendersi che la popolazione di Sredni Stog, una volta acquisite le cavalcature, abbia radicalmente modificato i propri rapporti con i vicini, come accadde agli indigeni americani. In effetti si osservano trasformazioni importanti. Nel tardo periodo di Sredni Stog, documentato a Dereivka, gli ornamenti in rame cominciano a essere presenti nelle tombe in numero e varietà mai visti prima a est del Dnepr.

Questi ornamenti mostrano chiaramente l'influenza della cultura di Cucuteni-Tripolje, che fiorì tra il 4500 e il 3500 a.C. negli altopiani boscosi compresi tra il Dnepr e i Carpazi e fu caratterizzata da grandi centri agricoli e da numerosi piccoli villaggi con edifici a due piani, dalla metallurgia del rame, da cerimonie che associavano i cereali a figurine femminili e da ceramiche policrome di grande raffinatezza tecnica. Inoltre ornamenti in rame di tipologia e composizione chimica analoga a quelli della cultura di Cucuteni-Tripolje sono stati ritrovati in necropoli di quest'epoca situate anche 900 chilometri a est di Dereivka. Questi ornamenti furono trasportati fino a Khvalynsk, che sorge lungo il medio corso del Volga, presumibilmente da intermediari che appartenevano alla popolazione di Sredni Stog.

L'impiego del cavallo da sella, permettendo contatti fra culture lontane, sembra aver favorito sia il commercio sia la guerra. I più grandi insediamenti della cultura di Cucuteni-Tripolje ebbero una crescita impressionante e arrivarono a occupare una superficie di oltre 300 ettari e a comprendere anche 1000 costruzioni. La spiegazione più plausibile per questa concentrazione senza precedenti della popolazione è di natura difensiva. Inoltre necropoli simili a quelle della popolazione di Sredni Stog compaiono verso il 3800 a.C. circa 600 chilometri a ovest del Dnepr, nell'Ungheria orientale e nella Romania occidentale. L'impiego dei cavalli da sella dovrebbe aver prodotto proprio trasformazioni di questo tipo: l'arricchimento della cultura di Sredni Stog, l'estensione delle vie commerciali e di comunicazione attraverso le praterie, la concentrazione a scopo difensivo delle popolazioni sedentarie di agricoltori e il trasferimento di gruppi portatori della cultura di Sredni Stog in aree ricche di risorse che in precedenza non avevano potuto sfruttare.

È possibile che i primi cavalieri parlassero una lingua che oggi prende il nome di proto-indoeuropeo. I glottologi hanno tentato di ricostruire questa lingua, da lungo tempo estinta, a partire da quelle da essa derivate, fra cui il sanscrito, il greco antico e il latino, oltre a lingue moderne come il francese, il tedesco, il russo e il persiano.

Nel secolo scorso alcuni archeologi e glottologi hanno cercato la «patria indoeuropea» nelle steppe dell'Ucraina, concentrandosi soprattutto sui siti - ricchi di ossa equine - della cultura di Yamna, discesa in parte da quella di Sredni Stog e diffusasi nelle steppe a nord del Mar Nero e del Mar Caspio. James Mallory del Queen's College di Belfast ha riproposto la teoria della patria ucraina. In alternativa, altri studiosi hanno recentemente ipotizzato che le lingue indoeuropee siano state diffuse, a partire dall'Anatolia, dall'espansione dei primi agricoltori durante il Neolitico, molto prima della domesticazione del cavallo (si veda l'articolo *La storia antica delle lingue indoeuropee* di Thomas V. Gamkrelidze e Vjačeslav V. Ivanov in «Le Scienze» n. 261, maggio 1990).

Anche gli autori di questo articolo sono in disaccordo tra loro per quanto riguarda l'origine indoeuropea. Ma se le popolazioni che parlavano alcuni dei primi dialetti indoeuropei vivevano effettivamente nelle steppe dell'Ucraina - un'affermazione sulla quale concordiamo unanimemente - allora l'introduzione qui avvenuta dell'impiego del cavallo da sella verso l'inizio del IV millennio a.C. fornisce un possibile meccanismo per la diffusione di queste popolazioni.

L'espansione verso oriente potrebbe essere stata compiuta grazie a una nuova organizzazione sociale ed economica basata sullo sfruttamento delle praterie per il pascolo e delle valli fluviali per un'agricoltura a piccola scala. La steppa era un ambiente ostile ché non poteva consentire una rilevante presenza umana prima dell'adozione di cavalcature; tuttavia questa innovazione contribuì a trasformare le vaste distese pianeggianti tra Europa e Asia da barriera a via di comunicazioni e scambi.

La diffusione verso est delle prime popolazioni che impiegavano il cavallo non deve aver trovato ostacoli nei pochi abitanti qui insediatisi in precedenza, mentre l'espansione verso occidente si scontrò inevitabilmente con le società agricole dell'Età del rame, già ben consolidate. I dati archeologici e i modelli teorici delle migrazioni tendono a confermare l'ipotesi che questi spostamenti ebbero luogo, prima verso est e poi verso ovest, fra il 3500 e il 3000 a.C.

In tutti questi sviluppi il cavallo ebbe un ruolo fondamentale, un ruolo che continuò ad avere nei successivi 5000 anni di storia. Ma è ormai chiaro che occorse molto tempo prima che l'impiego del cavallo da sella si diffondesse verso sud, nel Medio Oriente. Quando finalmente i cavalli fecero la loro comparsa in questa regione, fra il 2200 e il 2000 a.C., vennero impiegati per compiti affidati in precedenza ad asini e ibridi asino-onagro, vale a dire come animali da traino per carri da guerra. La maggiore taglia e velocità dei cavalli e forse nuovi sistemi di controllo basati sul morso contribuirono al perfezionamento della biga da guerra, avvenuto intorno al 1800 a.C. Fu come animale da traino che il cavallo fece il suo ingresso nella storia, due millenni dopo essere stato sottoposto per la prima volta alle redini.

BIBLIOGRAFIA

ANTHONY DAVID W., *The «Kurgan Culture», Indo-European Origins, and the Domestication of the Horse: A Reconsideration* in «Current Anthropology», 27, n. 4, agosto-ottobre 1986.

TELEGIN DIMITRI Y., *Dereivka: A Settlement and Cemetery of Copper Age Horse Keepers on the Middle Dneiper* in «British Archaeological Reports», International Series 287, 1986.

ANTHONY DAVID W., *The Domestication of the Horse* in *Equids in the Ancient World*, vol. 2, a cura di Richard H. Meadow e Hans-Peter Uerpmann, Ludwig Reichert Verlag, 1991.

ANTHONY DAVID W. e BROWN DORCAS R., *The Origins of Horseback Riding* in «Antiquity», 65, n. 246, marzo 1991.

I GRANDI SCIENZIATI

Ai personaggi che hanno fatto fare passi da gigante al pensiero umano e ai retroscena delle loro scoperte

LE SCIENZE

edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

ha dedicato numerosi articoli tra cui:

COPERNICO E TYCHO BRAHE
di O. Gingerich
(n. 67, marzo 1974)
La scoperta della copia del libro di Copernico annotata da Tycho Brahe.

ALFRED WEGENER E L'IPOTESI DELLA DERIVA DEI CONTINENTI
di A. Hallam
(n. 82, giugno 1975)
Nel 1912 questo scienziato avanzava l'ipotesi che i continenti si muovono e proponeva una teoria della loro migrazione.

GAUSS
di I. Stewart
(n. 111, novembre 1977)
Si trovava a suo agio sia con le astrazioni della teoria dei numeri sia con i lunghi calcoli dell'astronomia e le applicazioni pratiche della fisica.

LA MELA DI NEWTON E IL DIALOGO DI GALILEO
di S. Drake
(n. 146, ottobre 1980)
Fu probabilmente un diagramma visto nei *Massimi Sistemi* di Galileo a far sì che Newton collegasse la caduta della famosa mela al moto orbitale della Luna.

SADI CARNOT
di S.S. Wilson
(n. 158, ottobre 1981)
È noto per l'analisi di una macchina termica ideale, ma i suoi interessi erano rivolti alle applicazioni pratiche dell'energia del vapore.

LA BREVE VITA DI ÉVARISTE GALOIS
di T. Rothman
(n. 166, giugno 1982)
Secondo la leggenda il giovane matematico formulò di getto la teoria dei gruppi nella notte precedente il duello che lo portò alla morte.

GEORG CANTOR E LA TEORIA DEGLI INSIEMI TRANSFINITI
di J.W. Dauben
(n. 180, agosto 1983)
Cantor ha dimostrato che esiste una gerarchia di infiniti, ciascuno più «grande» del precedente; oggi la sua teoria degli insiemi è uno dei cardini della matematica.

MONDINO DE' LIUZZI
di P.L. Lollini e L. Pelegatti
(n. 182, ottobre 1983)
Ebbe il merito di rinnovare la scienza medica medievale introducendo nell'aula universitaria la dissezione a scopo didattico e di ricerca.

DARWIN GEOLOGO
di S. Herbert
(n. 215, luglio 1986)
Nei cinque anni passati sulla *Beagle* la sua principale attività di ricerca riguardò la geologia.

WILLIAM HERSCHEL E LA NASCITA DELL'ASTRONOMIA MODERNA
di M. Hoskin
(n. 216, agosto 1986)
Mediante i telescopi da lui stesso costruiti Herschel scoprì migliaia di stelle e nebulose.

I CONTRIBUTI DI LEONARDO ALLA MECCANICA TEORICA
di V. Foley e W. Soedel
(n. 219, novembre 1986)
Un esame approfondito dei *Codici di Madrid* fa emergere l'importanza delle intuizioni di Leonardo su quattro aspetti fondamentali della meccanica.

ANDRÉ-MARIE AMPÈRE
di L. Pearce Williams
(n. 247, marzo 1989)
Fu il primo ricercatore a valutare quantitativamente gli effetti magnetici della corrente elettrica, ma si interessò anche di filosofia della scienza.

Combustibili chimici dal Sole

Per superare i limiti della conversione diretta della radiazione solare in elettricità, si stanno sperimentando nuovi metodi per accumulare l'energia termica del Sole in composti di facile trasporto e utilizzazione

di Israel Dostrovsky

Poiché i combustibili fossili sono disponibili in quantità finite, è indispensabile scoprire fonti sostitutive di energia. La ricerca è resa anche più urgente dalla consapevolezza che il consumo di combustibili fossili compromette il clima terrestre con l'emissione di anidride carbonica. Questo gas infatti, permanendo nell'atmosfera, contribuisce, come noto, all'effetto serra. La nuova energia dovrà essere rinnovabile, disponibile in quantitativi sufficienti a soddisfare una domanda di dimensioni mondiali e innocua per l'ambiente. Oggi conosciamo una sola fonte che risponda a questi requisiti: il Sole.

Di primo acchito il Sole sembra rappresentare la soluzione ideale. L'energia della radiazione solare che raggiunge annualmente la superficie terrestre è di 3,9 milioni di exajoule. (Un exajoule è pari a un miliardo di gigajoule, approssimativamente la quantità di calore prodotta dalla combustione di 22 milioni di tonnellate di petrolio.) Poiché il consumo globale annuo di energia è di 350 exajoule, tale quantitativo potrebbe essere fornito dai raggi solari che cadono su meno dello 0,1 per cento della superficie terrestre, sfruttati con un rendimento non superiore al 10 per cento. Sebbene tali considerazioni siano semplificate alquanto grossolanamente, un'analisi più accurata conferma la tesi di fondo: l'energia solare potrebbe facilmente fornire oltre 450 exajoule all'anno, anche se venisse catturata solo da una piccola parte delle aree desertiche caratterizzate da una maggiore irradiazione solare.

A questo punto occorre affrontare due problemi. Innanzitutto le regioni più esposte ad abbondanti irradiazioni solari non coincidono con le zone in cui sono concentrate popolazione e industrie e dove la domanda di energia è maggiore. Inoltre l'energia solare è discontinua.

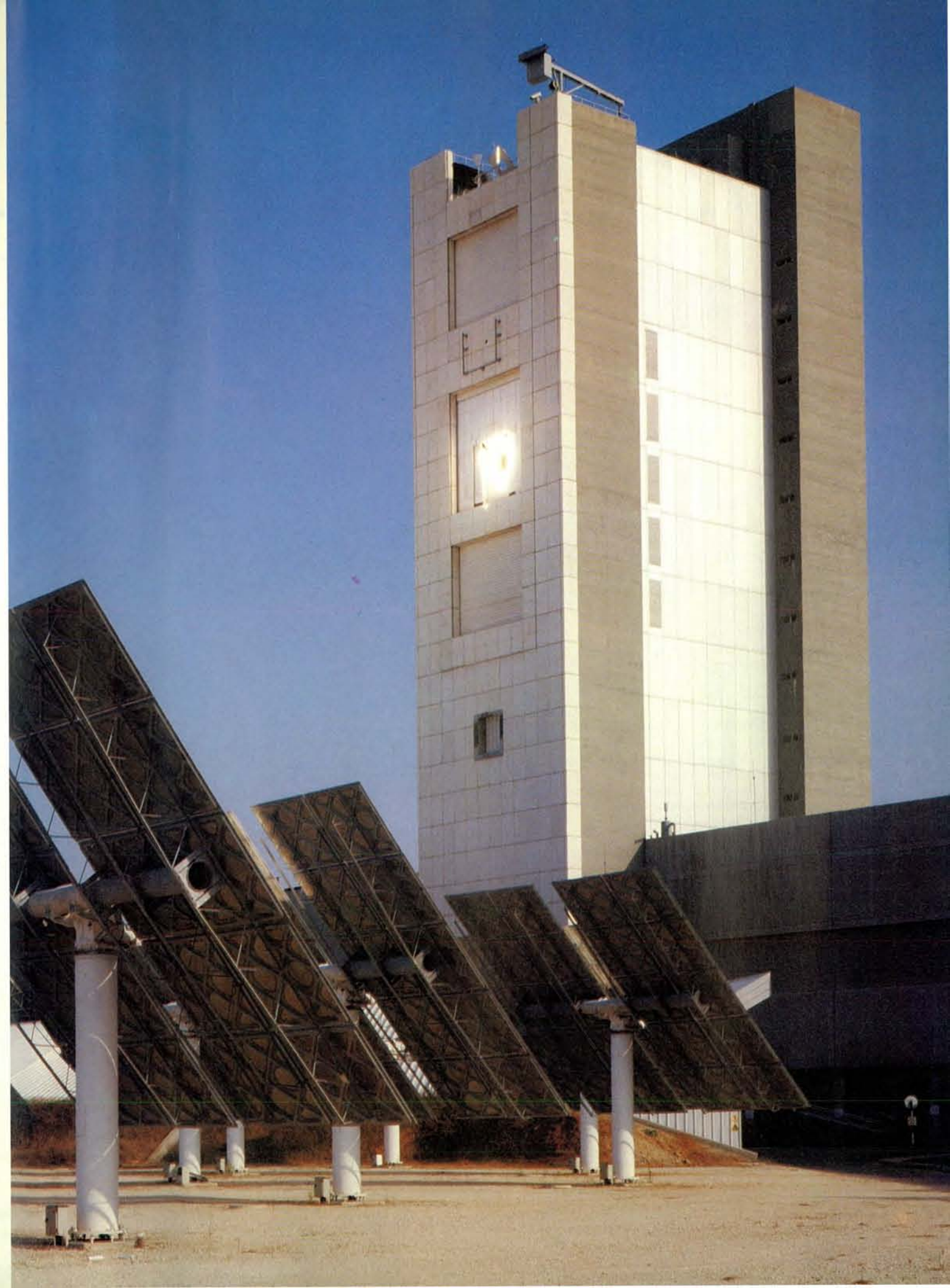
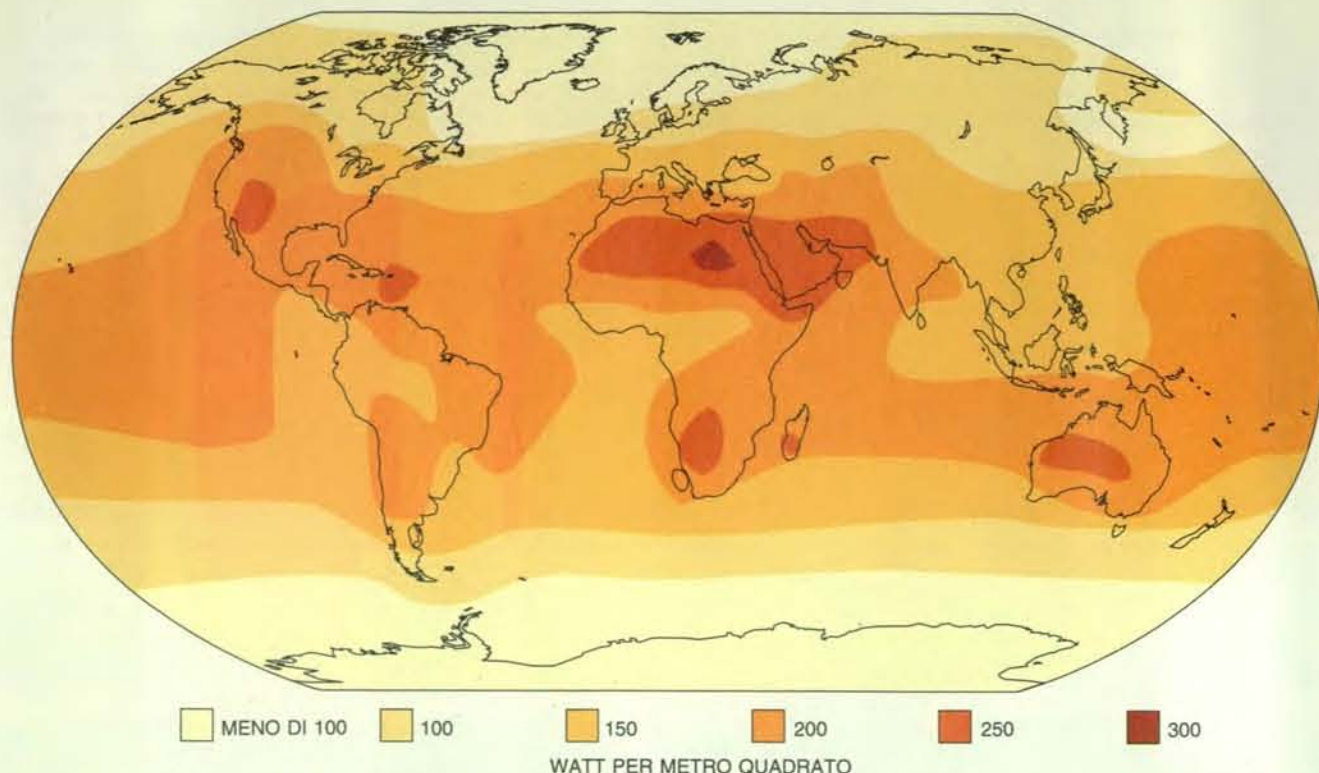
Questi problemi si traducono nella necessità di sviluppare processi in grado di catturare energia solare su grande scala e convertirla in forme adatte all'immagazzinamento a lungo termine e al trasporto ad ampio raggio. Non ci sono ancora mezzi tecnologici ed economici soddisfacenti per raggiungere tali obiettivi, in parte perché i capitali destinati a queste ricerche sono scarsi. Per esempio, sebbene l'International Energy Agency dedichi più del 60 per cento del suo bilancio per la ricerca a progetti legati all'energia nucleare, riserva meno del 4 per cento alla ricerca sull'energia solare.

La maggior parte delle (scarse) ricerche sull'energia solare si concentra sulla conversione della radiazione solare in elettricità, principalmente attraverso metodi fotovoltaici e termici. Nella conversione fotovoltaica, dispositivi a stato solido trasformano la radiazione solare direttamente in elettricità (tale procedimento fornisce energia a molti satelliti artificiali). Nella conversione termica la radiazione solare viene dapprima trasformata in calore che a sua volta aziona turbine a vapore e generatori elettrici. Il principale esempio di un'applicazione di questo genere si trova a Daggett, in California, dove impianti basati su un progetto della LUZ International, una società israeliana, generano circa 400 megawatt di potenza.

Sebbene l'elettricità costituisca uno dei principali mezzi per fornire energia (in realtà rappresenta un terzo dell'energia primaria mondiale) non costituisce la risposta a tutti i problemi connessi all'impiego dell'energia solare: essa non può infatti venire immagazzinata comodamente, mentre trasportarla per lunghe distanze origina un'altra serie di problemi. Non è, quindi, sufficiente sviluppare soltanto elettricità solare, occorre trovare il modo per convogliarla.

Per poter essere immagazzinata e trasportata l'energia solare deve essere convertita in energia chimica accumulabile in sostanze che, a loro volta, possono essere distribuite tramite condutture (o immagazzinate) e quindi essere impiegate come combustibili per l'azionamento di macchinari. Alcune sostanze si possono anche utilizzare per generare direttamente elettricità. La produzione di combustibili chimici con procedimenti che utilizzano il Sole come fonte primaria di energia potrebbe risolvere le incombenti crisi energetica e ambientale.

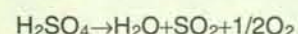
Molti tentativi di produrre combustibili chimici con procedimenti che sfruttino l'energia solare si sono concentrati sull'idrogeno. L'idrogeno può essere ottenuto facilmente con l'elet-

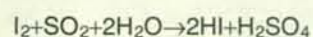
La torre solare del Weizmann Institute of Science di Rehovot, in Israele, concentra la radiazione solare per fornire calore a reazioni che producono combustibili chimici. Sono già stati costruiti impianti di questo tipo capaci di fornire più di un milione di watt di potenza.

La quantità media di radiazione solare (watt per metro quadrato) che colpisce la superficie terrestre è mostrata nel corso di 24 ore. La radiazione solare, per la sua disponibilità, è evidentemente un'ottima fonte di energia: perché risulti di pratico impiego, però, l'energia derivata dal Sole deve essere convertita in una forma facile da trasportare e immagazzinare.

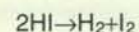
Produrre idrogeno mediante reazioni con anidride solforosa

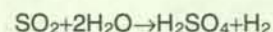
L'idrogeno può essere utilizzato come combustibile chimico: il primo passo, comune a tutti i seguenti processi produttivi, può sfruttare la luce solare.

■ L'idrogeno può essere generato mediante diverse reazioni che impiegano l'anidride solforosa (SO_2) ottenibile attraverso la decomposizione a temperatura elevata di acido solforico (H_2SO_4):

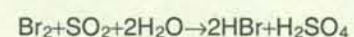
$$H_2SO_4 \rightarrow H_2O + SO_2 + 1/2O_2$$

Un modo per produrre idrogeno dall'anidride solforosa, ideato alla General Atomics di San Diego, in California, prevede l'aggiunta di iodio (I_2):

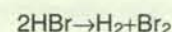
$$I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HI + H_2SO_4$$

In seguito la decomposizione termica delle molecole di ioduro di idrogeno (HI) produce idrogeno:

$$2HI \rightarrow H_2 + I_2$$

■ Un secondo procedimento (di natura elettrolitica) per produrre idrogeno è stato sviluppato presso la Westinghouse:

$$SO_2 + 2H_2O \rightarrow H_2SO_4 + H_2$$

Il vantaggio che deriva da questo procedimento è dato dal fatto che richiede l'applicazione di una tensione di soli 0,29 volt, molto inferiore ai quasi due volt necessari per produrre idrogeno direttamente dall'elettrolisi dell'acqua.

■ Un terzo procedimento, anch'esso elettrolitico, è stato sviluppato presso i Laboratori di Ispra (VA); il procedimento si basa sull'impiego di bromo (Br_2):

$$Br_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HBr + H_2SO_4$$

L'applicazione di 0,62 volt alle molecole di bromuro di idrogeno (HBr) produce idrogeno

$$2HBr \rightarrow H_2 + Br_2$$

trolisi dell'acqua ed essere immagazzinato e trasportato su lunghe distanze. Nella combustione, l'idrogeno produce acqua, ed è quindi un combustibile esente da emissioni inquinanti. Tuttavia, solo se l'elettricità impiegata per produrre l'idrogeno viene generata a partire da fonti non fossili come radiazione solare, acqua o vento, l'uso di tale gas come combustibile può essere considerato realmente innocuo per l'ambiente. Un sistema di questo tipo è attualmente in dimostrazione in Arabia Saudita. Il progetto HYSOLAR, al quale collaborano Arabia Saudita e Germania, è composto da un generatore fotovoltaico con una capacità di 350 chilowatt e da un impianto elettrolitico che produce idrogeno.

Il rendimento globale della produzione di idrogeno attraverso l'elettrolisi viene calcolato combinando il rendimento della generazione di elettricità da una particolare fonte rinnovabile e quello dello stesso processo elettrolitico. Negli ultimi anni si è lavorato molto per migliorare entrambi: oggi il rendimento nella generazione di elettricità commerciale da fonti solari si aggira sul 12 per cento, mentre quello che coinvolge acqua ed elettrolisi è di circa il 70 per cento, producendo un valore globale di circa l'8 per cento. Quando i vari progetti per sviluppare impianti a generazione solare più efficienti porteranno frutti, la strada dell'elettrolisi verso combustibili di origine solare diventerà più interessante.

Nella misura in cui l'energia idroelettrica può essere considerata una forma indiretta di energia solare, le grandi quantità di idrogeno prodotte per via elettrolitica in certi paesi (in particolare Norvegia e Canada) possono essere considerate come un esempio di combustibile prodotto dal Sole. In questi casi, tuttavia, l'idrogeno viene usato dall'industria chimica come materia prima per sintetizzare ammoniaca e non come forma immagazzinabile di energia.

I problemi del miglioramento dell'elettrolisi per una produzione su larga scala di idrogeno hanno portato a una ricerca di altri modi di produrre idrogeno. La ricerca abbraccia anche altri sistemi chimici che non si basano sulla produzione intermedia di elettricità.

Teoricamente è possibile produrre idrogeno dall'acqua semplicemente riscaldandola ad alte temperature. Oltre i 2000 gradi Celsius il vapore d'acqua contiene apprezzabili quantità di idrogeno. Tali temperature possono facilmente essere prodotte da radiazione solare concentrata, ma il problema di questo procedimento consiste nell'impedire che idrogeno e ossigeno si ricompongano quando il vapore si raffredda; i due prodotti devono infatti essere separati quando la temperatura è ancora alta. Lo sviluppo di un processo di separazione adatto al funzionamento a temperature superiori ai 2000 gradi Celsius non è un problema da poco e la ricerca in questo campo è ancora attiva.

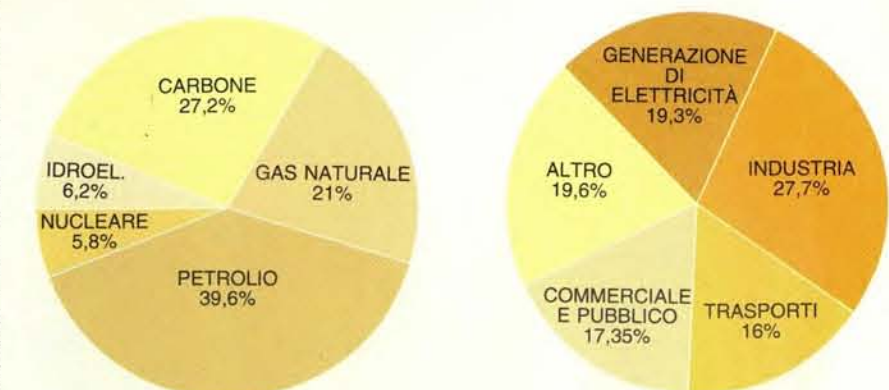
La maggior parte dell'idrogeno impiegato industrialmente viene prodotta a partire da idrocarburi (carbone, gas naturale o derivati del petrolio), e quindi con un combustibile fossile come fonte primaria. Tali procedimenti sono naturalmente poco interessanti nel contesto che qui ci interessa, in quanto impiegano appunto fonti fossili. Il quadro cambia però quando si consideri la biomassa (termine generico per materiale vegetale) come sostituto degli idrocarburi in alcuni di questi processi. La biomassa è prodotta dall'energia solare attraverso la fotosintesi: utilizzandola come materia prima e impiegando la radiazione solare come fonte di energia si avrebbe un sistema con le caratteristiche desiderate.

Questa applicazione dell'energia solare è basata sul riscaldamento di una sostanza organica a temperatura sufficientemente alta (da 700 a 900 gradi Celsius): in assenza di aria e in presenza di vapore acqueo, questa si decompone producendo una miscela gassosa di idrogeno e monossido di carbonio. Il gas ha un calore di combustione basso, ma comunque sufficiente per generare vapore o elettricità.

In più, la composizione del gas può essere regolata per produrre quello che nell'industria è noto come gas di sintesi, o syngas. Si tratta di una miscela di idrogeno e monossido di carbonio in proporzioni comprese tra 2:1 e 3:1, da cui, come indica il nome, può essere sintetizzata una grande varietà di materiali, tra i quali combustibili liquidi, come metanolo e benzina, nonché idrogeno puro.

Attualmente la grande quantità di calore necessaria per la gassificazione viene prodotta bruciando materiale organico: impiegare calore proveniente da fonti solari, cosa abbastanza semplice, raddoppierebbe, perlomeno, la produzione di syngas e di qualsiasi materiale o combustibile da esso prodotto. L'anidride carbonica emessa quando i materiali vegetali sono bruciati o fatti fermentare non viene però aggiunta all'atmosfera, ma riciclata; il processo restituisce infatti all'atmosfera il materiale sottrattole.

Il processo di gassificazione si può applicare a materiali contenenti carbonio diversi dalla biomassa, in pratica a quasi tutti i combustibili fossili, di tipo convenzionale e non. In questi metodi l'impiego di combustibili derivati dal syngas fornisce anidride carbonica all'atmosfera e quindi all'effetto serra ma, anche in questo caso, se la fonte del calore per la gassificazione e la lavorazione successiva è il Sole, la quantità effettiva di materie prime sarà più che raddoppiata e l'emissione di anidride carbonica per unità di combustibile consumata risulterà più che dimezzata.

Un'applicazione particolarmente interessante di tecnologie simili sorge in connessione con i problemi di immagazzinamento a lungo termine e trasmissione a grandi distanze dell'energia solare.

Le proporzioni globali delle fonti energetiche primarie (*a sinistra*) e gli impieghi principali per cui queste vengono utilizzate (*a destra*) rivelano come, in realtà, l'energia elettrica rappresenti solamente un terzo dell'energia primaria distribuita.

L'energia fornita dalla radiazione solare può essere immagazzinata in vari combustibili e sostanze chimiche: lo schema mostra i diversi metodi utilizzati per produrli.

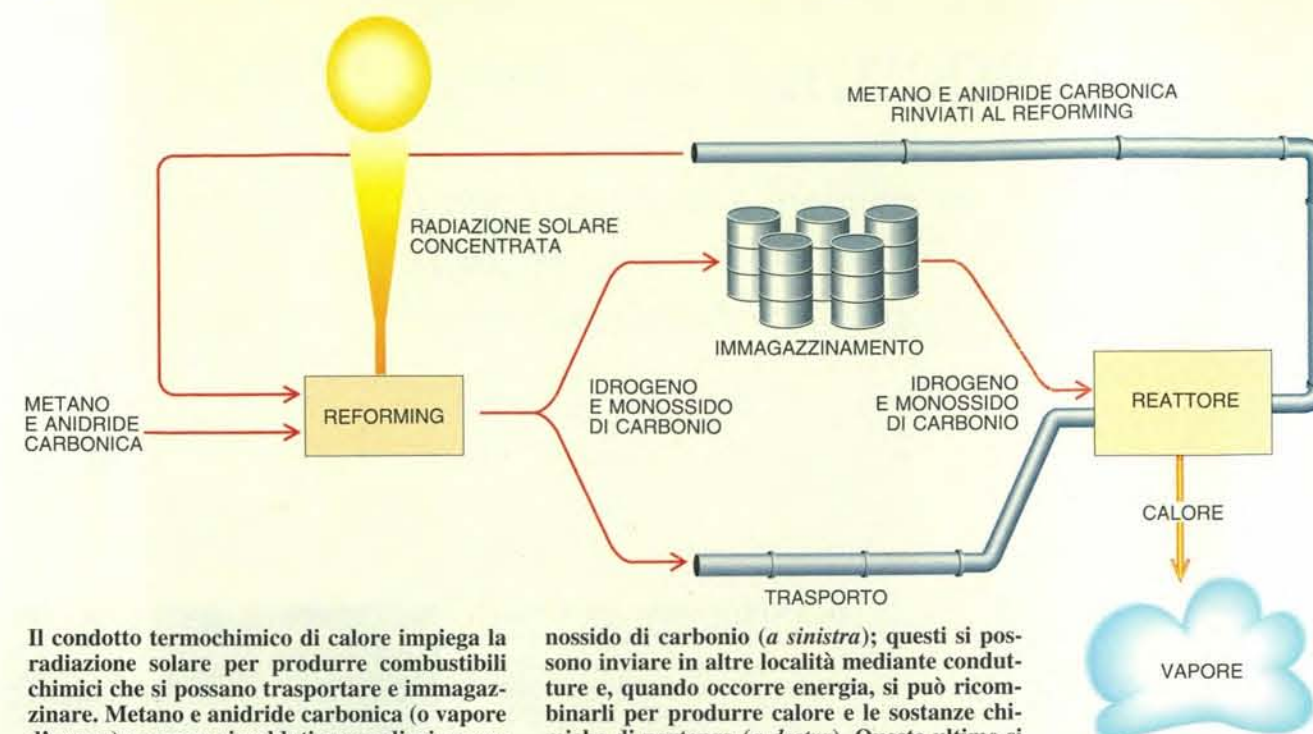
La radiazione solare concentrata può essere prodotta per mezzo di una fornace solare (*in alto*) o tramite un concentratore parabolico (*in basso*). La fornace incrementa l'intensità della radiazione fino a 10 000 volte ed è in grado di fornire decine di migliaia di watt di potenza; il paraboloide produce invece fino a 150 000 watt. Questa fornace si trova presso il Weizmann Institute; il paraboloide, installato nei pressi di Stoccarda, appartiene al Centro tedesco di ricerca aerospaziale.

Negli anni settanta, presso il Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA), un centro di ricerche nucleari in Germania, fu proposto e sperimentato un nuovo sistema per immagazzinare calore nucleare in una sostanza chimica adatta all'impiego commerciale e industriale. L'impresa si basò sulle stesse considerazioni che caratterizzano le ricerche sullo sfruttamento dell'energia solare, ossia poter portare il calore dal luogo di produzione agli utenti e poter servire un segmento più ampio del mercato energetico rispetto a quanto consenta la sola elettricità.

Invece di affidarsi a un unico combustibile, l'idrogeno, prodotto nel reattore nucleare, trasmesso all'utente e quindi bruciato, il gruppo del KFA cercò di ideare un sistema chimico reversibile, che avrebbe cioè assorbito una grande quantità di calore per generare prodotti, facilmente trasportabili per distanze indefinite, da consegnare agli utenti; questi avrebbero quindi invertito la reazione, recuperando il calore e rigenerando le sostanze chimiche di partenza che sarebbero state rinviate al reattore. Gli ideatori chiamarono questa idea «condotto termochimico di calore».

Diversi sistemi chimici potrebbero essere utilizzati in un condotto termochimico di calore, ma non tutti sono ugualmente convenienti. Gli sperimentatori del KFA scelsero la reazione di *steam reforming*, un processo ben noto nell'industria petrolchimica. Il metano viene fatto reagire con vapore ad alta temperatura in presenza di un catalizzatore per ottenere una miscela di idrogeno e monossido di carbonio, lo stesso syngas descritto sopra, che può restare immagazzinato indefinitamente a temperatura ambiente ed essere distribuito agli utenti attraverso normali condutture.

L'utente fa reagire nuovamente la miscela per mezzo di catalizzatori. Ne risultano calore, che viene utilizzato per qualunque scopo l'utente desideri, e le sostanze chimiche di partenza, che vengono restituite al reattore di reforming. Sperimentazioni del processo che impiegavano una fonte di calore elettrica anziché un reattore nucleare hanno generato una potenza di oltre 10 milioni di watt. (Le restrizioni generali imposte all'industria nucleare sono intervenute prima che fosse possibile provare un processo del genere in un reattore.)

Il concetto di condotto termochimico di calore applicato all'energia solare è oggetto di studi presso il Weizmann Institute of Science di Rehovot, in Israele, e presso il Centro tedesco di ricerca aerospaziale (DLR). Il lavoro impiega le reazioni tra metano e vapore e tra metano e anidride carbonica, le quali avvengono a temperature comprese tra i 900 e i 1000 gradi Celsius sulla superficie di catalizzatori solidi che di solito contengono nichel o rodio. L'alta temperatura necessaria al funzionamento dei reattori di reforming è prodotta da radiazione solare concentrata. Essendo un processo a

Il condotto termochimico di calore impiega la radiazione solare per produrre combustibili chimici che si possano trasportare e immagazzinare. Metano e anidride carbonica (o vapore d'acqua) vengono riscaldati con radiazione solare concentrata per produrre idrogeno e monossido di carbonio (*a sinistra*); questi si possono inviare in altre località mediante condutture e, quando occorre energia, si può ricombinarli per produrre calore e le sostanze chimiche di partenza (*a destra*). Queste ultime si possono poi impiegare per ripetere il processo.

ciclo chiuso, non si consumano materiali e non si disperdono sottoprodotti nell'atmosfera. Questo sistema presenta un grande pregio: le sue tre funzioni (catturare l'energia solare e convertirla in energia chimica, immagazzinare l'energia e impiegarla infine per generare elettricità o fornire calore per un processo industriale) si possono svolgere in località diverse, ognuna scelta per svolgere al meglio la sua particolare funzione.

La radiazione solare concentrata, necessaria per questi processi, può essere catturata per mezzo di specchi disposti secondo varie configurazioni. Le tecnologie disponibili comprendono la fornace solare, il concentratore parabolico e la torre solare. La scelta più conveniente dipende dalla quantità di energia voluta: le fornaci solari possono fornire potenza nell'ordine di diverse decine di chilowatt, i concentratori parabolici nell'ordine delle centinaia di chilowatt mentre le torri arrivano a fornire migliaia di chilowatt. Le torri solari commerciali mirano a conseguire potenze nell'ordine delle centinaia di megawatt; si stima che le torri sperimentali attualmente funzionanti siano in grado di garantire da tre a cinque megawatt.

Qualunque mezzo si scelga per concentrare la radiazione solare, il sistema più elegante per far sì che l'energia solare inneschi le reazioni consiste nell'illuminazione diretta dei catalizzatori con radiazione solare concentrata. Un sistema invia la radiazione nel reattore di reforming attraverso una finestra, che impedisce al contenuto di venire a contatto con l'atmosfera. Il problema principale è dato dalle grandi dimensioni della finestra, necessarie per un funzionamento di grande scala.

Con un altro metodo, che non necessita di una finestra ma deve far arrivare in modo meno diretto la radiazione solare nella miscela di reazione, questa è chiusa in tubi riscaldati dall'esterno dalla radiazione. Il sistema è stato sperimentato con successo presso la Schaefer Solar Furnace Facility del Weizmann Institute, dove una versione ingrandita con una potenza di 400 chilowatt è in fase di costruzione alla Kay Family Solar Spire.

Per proteggere i tubi dal surriscaldamento assicurando una uniforme e facilmente controllabile trasmissione di energia, si connette la radiazione solare alla reazione chimica. Secondo un sistema proposto per la prima volta ai Sandia National Laboratories di Albuquerque, i tubi di reazione sono immersi in vapori di sodio messo in ebollizione da radiazione solare concentrata e mantenuti a temperatura costante. Una verifica di quest'idea, conclusasi con un successo, è stata condotta congiuntamente da un gruppo dei Sandia e del Weizmann Institute presso la Schaefer Solar Furnace.

Il calore può anche essere trasferito per mezzo di aria fatta circolare in un rivestimento attorno ai tubi; vari progetti per un sistema di questo tipo sono attualmente in fase di sperimentazione in Israele e in Spagna.

Altre idee su come riscaldare l'aria portandola a elevate temperature tramite l'energia solare vengono oggi sviluppate in laboratori israeliani, tedeschi, spagnoli e statunitensi. Tutti i metodi prevedono che l'aria scorra sopra vaste superfici (costituite da griglie metalliche, schiume o strutture a nido d'ape di ceramica oppure particelle in sospensione riscaldate da radiazione solare concentrata). Se il sistema fosse pressurizzato occorrerebbero finestre, mentre in caso contrario esso risulterebbe assai semplificato.

La posta in gioco in questo campo è alta. Sviluppare con successo questi progetti produrrebbe un'ampia disponibilità di energia pulita a cui potremo attingere fintanto che splenderà il Sole.

BIBLIOGRAFIA

BECKER M. (a cura), *Solar Thermal Central Receiver Systems*, Springer-Verlag, 1987.

DOSTROVSKY I., *Energy and the Missing Resource*, Cambridge University Press, 1988.

WINTER CARL-JOCHEN e NITSCH JOACHIM (a cura), *Hydrogen as an Energy Carrier: Technologies, Systems, Economy*, Springer-Verlag, 1988.

GUPTA B. P. (a cura), *Solar Thermal Technology: Research and Development and Applications*, Proceedings of the Fourth International Symposium, New Mexico, 1988, Hemisphere Publications, 1990.

Il tacchino di boscaglia

Questo galliforme australiano appartiene a una famiglia i cui membri costruiscono cumuli entro i quali fanno incubare le uova; un siffatto procedimento richiede notevoli adattamenti sia dell'uovo sia del pulcino

di Roger S. Seymour

In Australia e nelle circostanti isole indo-pacifiche vive un gruppo di uccelli molto particolari: chiamati familiarmente costruttori di cumuli, non covano le loro uova, ma le depongono in siti nei quali il calore per l'incubazione proviene dall'esterno. Alcune specie che vivono nelle isole tropicali sotterrano le uova nella sabbia riscaldata dal calore solare o dall'attività geotermica, mentre altre costruiscono mucchi di lettiera vegetale nei quali è l'energia prodotta durante la decomposizione microbica a mantenere elevata la temperatura.

Le 19 specie di questa famiglia di uccelli galliformi, i megapodiidi, chiamati così per i piedi eccezionalmente grandi, non sono coinvolte nell'allevamento della prole più di quanto lo siano nella cova. A differenza dei premurosi genitori di un giovane fringuello o di un tordo, quelli dei megapodiidi non curano e non nutrono la loro prole appena uscita dall'uovo.

Per raggiungere il prima possibile l'autonomia, le uova e i piccoli dei megapodiidi dispongono di speciali adattamenti. L'uovo è in grado di svilupparsi nel cumulo, un ambiente che farebbe morire gli embrioni della maggior parte degli uccelli. Alla nascita i piccoli megapodiidi non solo possiedono una capacità respiratoria diversa da quella della maggior parte degli uccelli, ma sono anche precocemente robusti e autonomi dal punto di vista dell'alimentazione.

Recenti studi su un costruttore di cumuli che vive nelle foreste tropicali e subtropicali australiane, il tacchino di boscaglia (*Alectura lathami*), hanno permesso di capire le caratteristiche dei cumuli, delle uova e della prole. Con l'aiuto dei miei colleghi David e Carol M. Vleck, David Bradford, David T. Booth e Dominic Williams ho esaminato la regolazione della temperatura nel cumulo, i meccanismi di scambio gassoso delle uova e dei microrganismi del cumulo, l'andamento energetico dello sviluppo embrionale e i dettagli dello straordinario mutamento biologico che si verifica durante la schiusa. Questi studi si inseriscono in un filone di ricerca iniziato 35 anni fa, quando fu affrontata per la prima volta la biologia riproduttiva del fagiano australiano (*Leipoa ocellata*), uno dei più famosi costruttori di cumuli di terriccio.

Il rituale caratteristico del tacchino di boscaglia in fase riproduttiva inizia nei mesi invernali, quando il maschio raccoglie la lettiera - costituita da foglie, rametti e muschi - e la spinge a colpi di zampa in boschetti o sotto la volta della foresta fino a formare un cumulo di circa un metro di altezza e cinque metri di diametro. Il tacchino di boscaglia poi rimescola il materiale e lo frantuma, scavando alla sommità del cumulo buche che dovranno essere successivamente riempite. Dopo qualche settimana il cumulo risulta costituito da materiale friabile, relativamente fine, coperto da uno strato di sterpi e rametti.

La decomposizione della lettiera è svolta principalmente da funghi e produce il calore che incuberà le uova. La temperatura del cumulo, dopo un periodo di iniziale variabilità causata dalle fasi biologiche dei microrganismi, si stabilizza intorno ai 33 gradi Celsius a una profondità di circa 60 centimetri, dove saranno collocate le uova. Questa temperatura d'incubazione rimane costante entro un intervallo di uno-due gradi per tutta la stagione riproduttiva.

Mentre il maschio costruisce il cumulo, la femmina si procura il nutrimento per produrre le uova. Quando il cumulo è pronto, la femmina può deporre un uovo ogni tre giorni per cinque-sette mesi sul fondo di un solco a cuneo da lei stessa scavato. Dal momento che il cumulo funziona come un'incubatrice continua, alcune uova si sviluppano e si schiudono mentre altre vengono deposte, sicché, in qualunque momento, possono essere presenti nel cumulo anche 16 uova.

Costruendo cumuli artificiali e manipolando quelli naturali siamo riusciti a determinare i fattori che portano alla stabilità termica. Primo, la dimensione del cumulo si è rivelata importante. Per esempio, sull'Isola dei Canguri, al largo dell'Australia meridionale, il tacchino di boscaglia costruisce cumuli del peso di circa 6,8 tonnellate e del volume di 12 metri cubi. I cumuli hanno un'elevata inerzia termica e sono virtualmente indipendenti dai cambiamenti giornalieri della temperatura esterna.

Il cumulo funziona anche da termostato. La temperatura interna dipende dal bilancio tra calore prodotto dai microrganismi e calore perso dal cumulo. Abbiamo misurato il tasso di consumo d'ossigeno dei microrganismi, correlato alla produzione di calore, e abbiamo trovato che esso aumenta esponenzialmente con la temperatura del cumulo. Anche la perdita di calore aumenta con la temperatura del cumulo, ma in modo meno graduale. Quando i valori dei due incrementi vengono riportati su un diagramma, le due linee si intersecano in un punto che indica la temperatura d'equilibrio alla quale il calore dissipato uguaglia quello prodotto.

È interessante notare che la temperatura del cumulo tende sempre a portarsi verso la temperatura di equilibrio. Per temperature interne al di sotto dell'equilibrio la produzione di calore è più elevata della perdita e il cumulo si riscalda. Per esempio, se il cumulo si raffredda perché il maschio ha praticato un'apertura per verificare la temperatura interna o perché la femmina ha scavato una nicchia per deporvi un uovo, il cumulo, una volta richiuso, tende a ripristinare la temperatura iniziale. D'altra parte, se la temperatura del cumulo è superiore a quella di equilibrio, questo si raffredda perché la perdita di calore è superiore alla produzione.

L'omeotermia del cumulo mantiene costante la temperatura, ma sono gli uc-

Il tacchino di boscaglia abita le foreste tropicali e subtropicali dell'Australia. Il maschio adulto (qui con un cartellino d'identificazione) costruisce cumuli per incubare le uova della compagna.

celli che devono stabilire la temperatura adatta per l'incubazione. Il tacchino di boscaglia saggia la temperatura introducendo il becco, lungo qualche centimetro, nel cumulo durante lo scavo. Se la temperatura interna è troppo bassa, l'uccello aggiunge al cumulo una piccola quantità di lettiera. Questa operazione apporta nutrienti ai microrganismi e innalza il livello di produzione del calore. Inoltre ingrandisce un po' il cumulo, riducendo così la perdita di calore. Questo lavoro è molto scrupoloso: un centimetro di nuovo materiale aggiunto al cumulo può infatti aumentare la temperatura interna di circa 1,5 gradi Celsius.

Una volta che il cumulo è costruito e la temperatura si è stabilizzata, gli uccelli non devono fare un gran che per mantenerla. In effetti, la temperatura è così stabile che alcuni cumuli trascurati mantengono temperature favorevoli all'incubazione per oltre sei mesi.

Vi sono altre caratteristiche del cumulo che servono a mantenere il calore. Di solito il nuovo cumulo è collocato sopra i resti di uno più vecchio che lo isola dal terreno. Inoltre, la conducibilità termica del terriccio è circa 2,4 milliwatt per centimetro per grado Celsius, un valore più basso di quello della sabbia asciutta. La bassa conducibilità, dovuta alla scarsa umidità del cumulo (contiene solamente 30 millilitri di acqua per 100 grammi di materiale solido) impedisce la perdita di calore.

Il cumulo d'incubazione è costituito da lettiera forestale asciutta che offre abbondanza di spazi d'aria. Mediamente i cumuli dell'Isola dei Canguri, al largo dell'Australia meridionale, pesano 6,8 tonnellate e hanno un volume di 12 metri cubi.

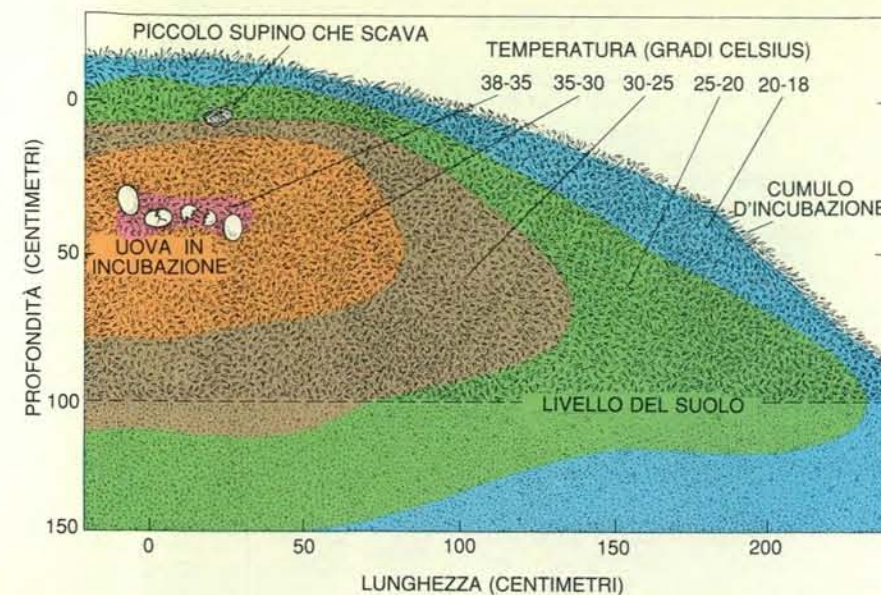
Anche se il cumulo fosse più umido, la temperatura d'incubazione potrebbe essere mantenuta da tassi di produzione e di perdita di calore più elevati. Questo processo richiederebbe l'accumulo di una maggiore quantità di foglie e rametti. Sta di fatto che i cumuli producono una quantità minima di calore, circa 100-200 watt, e che la temperatura della lettiera si mantiene per diversi mesi.

I tacchini di boscaglia possono anche sfruttare il tempo atmosferico a loro vantaggio. Più di 50 anni fa il famoso naturalista australiano David H. Fleay ha ipotizzato che questi uccelli potessero controllare l'entrata della pioggia modificando la forma del cumulo: mantenendolo arrotondato alla sommità quando il materiale era umido e scavando un cratere quando era necessaria acqua. Le nostre osservazioni hanno confermato questa congettura.

Il fabbisogno energetico è maggiore per gli embrioni che devono provvedere a se stessi dopo l'uscita dall'uovo, come nel caso del fagiano australiano e del tacchino di boscaglia, che non per i galliformi accuditi dai genitori. Le aree delimitate da ciascuna curva rappresentano il fabbisogno energetico dell'embrione, espresso in chilojoule. Le curve indicano il consumo d'ossigeno e una misura correlata, il tasso metabolico, dal momento della deposizione dell'uovo fino all'istante della schiusa.

La corretta regolazione degli scambi gassosi procede in perfetta sintonia con la regolazione della temperatura del cumulo. Secondo alcuni ricercatori il calore del cumulo è generato dalla fermentazione, ma noi riteniamo che esso sia prodotto dalla respirazione aerobica. I microrganismi consumano ossigeno al tasso di circa 20 litri all'ora, 60 volte la quantità consumata da tutte le uova del cumulo. L'ossigeno è rifornito dall'aria che diffonde attraverso gli spazi tra le particelle della lettiera, i quali assommano a circa il 70 per cento del volume del cumulo.

Un basso contenuto di acqua massimizza gli spazi d'aria e assicura che i livelli d'ossigeno in prossimità delle uova non si abbassino troppo e che quelli di anidride carbonica non si alzino troppo. Ciononostante, il contenuto di ossigeno passa dal 21 per cento alla superficie del cumulo a circa il 17 per cento in vicinanza delle uova, mentre i livelli di anidride carbonica vanno da zero al quattro per cento.

Questi livelli gassosi risulterebbero dannosi per l'embrione se l'uovo non fosse dotato di una particolare struttura. Tenendo conto delle dimensioni delle specie, il guscio ha uno spessore che è circa metà di quello di un uovo normale

La sezione di un cumulo mostra che la regione più calda si trova a una profondità di circa 60 centimetri. La respirazione dei microrganismi e degli embrioni riduce i livelli di ossigeno e aumenta quelli di anidride carbonica attorno alle uova.

e ciò fa aumentare la permeabilità diminuendo il tratto che il gas deve percorrere per diffondersi.

David Booth e io abbiamo anche scoperto che lo strato interno del guscio viene sciolto dall'embrione durante lo sviluppo; così si elimina la parte più stretta dei pori del guscio, quella rivolta verso la parete interna, e la permeabilità del guscio ai gas risulta tre volte più elevata di quella della maggior parte delle uova di uccello (si veda l'articolo *Come respirano le uova degli uccelli* di Hermann Rahn, Amos Ar e Charles V. Paganelli in «Le Scienze» n. 128, aprile 1979). L'aumento della permeabilità controbilancia quasi completamente gli abnormi livelli gassosi del cumulo ed espone l'embrione all'interno del guscio a concentrazioni di ossigeno e di anidride carbonica perfettamente paragonabili a quelle della maggior parte degli uccelli.

Avere un guscio sottile potrebbe mettere in pericolo l'embrione del tacchino di boscaglia in altro modo. Per esempio, tra gli uccelli intossicati dal DDT è frequente la rottura dei gusci (resi molto più fragili dall'insetticida) durante la cova (si veda l'articolo *Gli insetticidi e la riproduzione degli uccelli* di David B. Peakall in «Le Scienze» n. 23, luglio 1970). Ma il cumulo protegge in modo spettacolare le uova dei megapodiidi da questo tipo di rottura. Siamo perfino rimasti in piedi su uova di tacchino di boscaglia sepolte a soli 10 centimetri di profondità senza romperle.

Le uova del tacchino di boscaglia differiscono dalle normali uova di uccello anche riguardo al risparmio di acqua. Il defunto Hermann Rahn della State University of New York a Buffalo, Amos Ar dell'Università di Tel Aviv e colleghi hanno dimostrato che, nel corso dell'incubazione, la maggior parte delle uova di uccello perde mediamente il 18 per cento del peso iniziale per evaporazione. Quest'acqua fa parte della quantità presente nell'uovo alla deposizione, in aggiunta a quella che si forma durante la demolizione della frazione lipidica del tuorlo. Il bilancio idrico è tale che al termine della cova viene persa pochissima acqua liquida.

Al contrario, le uova del tacchino di boscaglia sono incubate in presenza di un'elevata umidità. Perdono per evaporazione solo il 9,5 per cento della loro acqua, nonostante richiedano un periodo d'incubazione di 49 giorni, circa 20 giorni più lungo di quello degli altri uccelli della stessa taglia. Inoltre, l'elevato metabolismo che caratterizza il lungo periodo d'incubazione produce una grande quantità di acqua, equivalente a circa il 7 per cento della massa iniziale dell'uovo. Perciò, le uova del tacchino di boscaglia perdono circa 25 millilitri di acqua in eccesso quando si schiudono.

Fummo sorpresi dell'evaporazione di acqua da parte delle uova, dal momento che l'umidità relativa nel cumulo supera il 99 per cento. Perciò abbiamo misurato la permeabilità del guscio, aspettandoci di trovare che l'uovo perdesse circa lo 0,1 per cento del suo peso iniziale e invece abbiamo trovato una perdita di quasi il 10 per cento. La forte discrepanza derivava da tre fattori che sono nuovamente caratteristici delle uova dei megapodiidi.

Il più importante è la produzione di calore metabolico da parte dell'embrione in ambiente fortemente isolato. Durante l'incubazione questo calore innalza progressivamente la temperatura dell'uovo da 33 a 38 gradi Celsius, aumentando così di 40 volte il gradiente di pressione di vapore attraverso il guscio. Le nostre misure sono state confermate da Ralph A. Ackerman e Richard C. Seagrave della Iowa State University che hanno costruito modelli matematici dei flussi di calore e di acqua in uova sepolte di megapodiidi.

Il secondo fattore che favorisce la perdita d'acqua è il modo in cui l'acqua stessa abbandona l'uovo. Essa esce chiaramente attraverso i pori del guscio per capillarità e non evapora finché non giunge in prossimità della superficie del guscio. Questo movimento diminuisce la distanza di diffusione per il vapore acqueo, quadruplicando di fatto la permeabilità del guscio al vapor d'acqua. Da ultimo, la permeabilità del guscio aumenta del 50 per cento poiché l'embrione assorbe calcio dal guscio durante lo sviluppo.

Le straordinarie caratteristiche dello sviluppo embrionale dei megapodiidi non si limitano alle peculiarità del cumulo e dell'uovo. In effetti, la loro respirazione embrionale è molto differente da quella della maggior parte degli uccelli. Tutti gli embrioni di uccello scambiano ossigeno e anidride carbonica con l'ambiente attraverso un particolare organo respiratorio, il corioallantoide, una doppia membrana prodotta dall'embrione, che si estende dalla regione ombelicale al guscio. A metà dell'incubazione il corioallantoide avvolge l'embrione e lo rifornisce continuamente di sangue. L'embrione completa lo sviluppo all'in-

La temperatura di equilibrio si raggiunge all'intersezione delle curve, quando il calore prodotto è pari a quello disperso.

terno di questo peculiare organo di scambio gassoso come se vivesse dentro il proprio polmone.

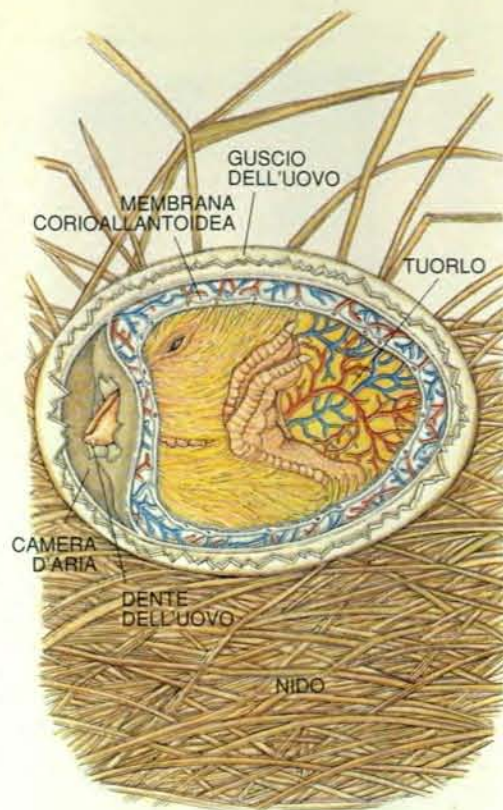
Per questo motivo, il pulcino dovrebbe trovarsi in difficoltà al momento della schiusa. In effetti, l'uscita dall'uovo richiede notevoli sforzi e di conseguenza una grande quantità di ossigeno mentre, nell'uscire dall'uovo, il piccolo deve distruggere la sua unica fonte di ossigeno, cioè il corioallantoide. La maggior parte degli uccelli ha risolto il problema cominciando a sviluppare i polmoni come effettivi organi di scambio gassoso ben prima della schiusa.

Durante l'incubazione, lo spazio lasciato nell'uovo dall'acqua evaporata è rimpiazzato da aria. Il gas si accumula in un compartimento che di solito si trova all'estremità arrotondata dell'uovo, dove le membrane appena sotto il guscio si scollano includendo aria. Questa camera d'aria, ben visibile quando si rassoda un uovo di gallina, si ingrandisce via via che l'acqua va perduta nel corso dello sviluppo e svolge un ruolo essenziale in quanto, verso il termine dell'incubazione, offre al piccolo uno spazio in cui infilare il becco per cominciare a ventilare i polmoni. Questo atto è chiamato pigolio interno ed è seguito, diverse ore dopo, dal pigolio esterno, quando il piccolo rompe il guscio in un punto e comincia a respirare l'aria esterna. Alcune ore più tardi il piccolo esce definitivamente dall'uovo.

La respirazione polmonare si sviluppa lentamente, nel corso di un'intera giornata, come ha dimostrato A. H. J. Visschedijk dell'Università di Utrecht nei suoi studi sui pulcini. Nel frattempo la circolazione nel corioallantoide si riduce gradualmente finché, alla schiusa, è praticamente cessata. Il pulcino a questo punto può farsi strada attraverso le membrane corioallantoidee senza il rischio di emorragie. Lo sviluppo della funzione polmonare fornisce al piccolo sufficiente ossigeno per soddisfare il suo fabbisogno metabolico durante la schiusa.

Nel neonato l'aerazione è un processo lento a causa della struttura del polmone: l'efficienza di questo organo dipende dalla possibilità che l'aria raggiunga la zona degli scambi gassosi. Ma, a differenza dei neonati di mammifero che possono espandere i polmoni e inspirare sufficiente gas negli alveoli per soddisfare il fabbisogno di ossigeno alla nascita, gli uccelli non possono espandere e contrarre tali organi. Questi sono costituiti da una serie di tubuli, i parabronchi, che si trovano in cavità polmonari di volume fisso (si veda l'articolo *Come respirano gli uccelli* di Knut Schmidt-Nielsen in «Le Scienze» n. 43, marzo 1972). L'aria è spinta nei parabronchi da diversi sacchi aerei dilatabili che funzionano come mantici. Gli scambi di ossigeno e anidride carbonica si verificano quasi esclusivamente nei piccoli capillari aeriferi a fondo cieco, interconnessi ai parabronchi.

Prima che i polmoni embrionali possano funzionare, il liquido che li riempie deve essere rimosso. Quando il neonato di mammifero, passando attraverso il canale del parto, emerge e fa i suoi primi tentativi di respirare, quasi tutto questo liquido viene rimosso nel giro di pochi minuti o secondi da cambiamenti del volume polmonare. Sebbene resti un po' di liquido negli alveoli polmonari, ne esce però abbastanza per soddisfare il fabbisogno di ossigeno del nuovo nato.

Il liquido polmonare riempie i capillari aeriferi dei tubuli parabronchiali dell'embrione degli uccelli, mentre la membrana corioallantoidea fornisce l'ossigeno necessario. Con il primo atto respiratorio viene eliminata parte del liquido paglierino. Dopo un giorno il liquido rimanente è completamente riassorbito nel sangue.

L'embrione di pollo respira nella camera d'aria dopo aver forato il corioallantoide. Il tacchino di boscaglia durante la schiusa si libera dal guscio forzando con le spalle. Il guscio è più sottile di quello della maggior parte degli uccelli e non presenta camera d'aria. Il piccolo esce dal cumulo scavando con le robuste zampe.

Negli uccelli, invece, il liquido contenuto nei polmoni a volume costante può essere rimosso solo attraverso il riassorbimento nel circolo sanguigno polmonare, un processo che richiede sempre parecchie ore. Per esempio, i polmoni del pulcino devono essere aerati per più di 24 ore prima della schiusa. In quel momento il volume d'aria raggiunge il 44 per cento del volume polmonare totale, circa due terzi del valore dell'adulto.

Il tacchino di boscaglia e probabilmente anche altri megapodiidi costituiscono un'eccezione a questa regola. Non vi è, in pratica, alcuna sovrapposizione nel passaggio dalla respirazione attraverso la circolazione corioallantoidea a quella polmonare, una transizione lenta considerata universale tra gli uccelli. Nel tacchino di boscaglia il polmone non contiene assolutamente aria prima della schiusa. Le membrane del guscio delle uova dei megapodiidi non sono adatte a formare una camera d'aria a una estremità, cosicché il pulcino non ha la possibilità di iniziare la respirazione all'interno dell'uovo.

Il pulcino inizia quindi a respirare solo subito dopo la schiusa. Il piccolo si libera premendo con le zampe contro il guscio e spingendo all'indietro finché la parete non si rompe di colpo. I piedi del pulcino producono lunghe lacerazioni nella membrana corioallantoidea, dove il flusso di sangue si arresta immediatamente quando la muscolatura liscia si contrae e il neonato inizia a respirare.

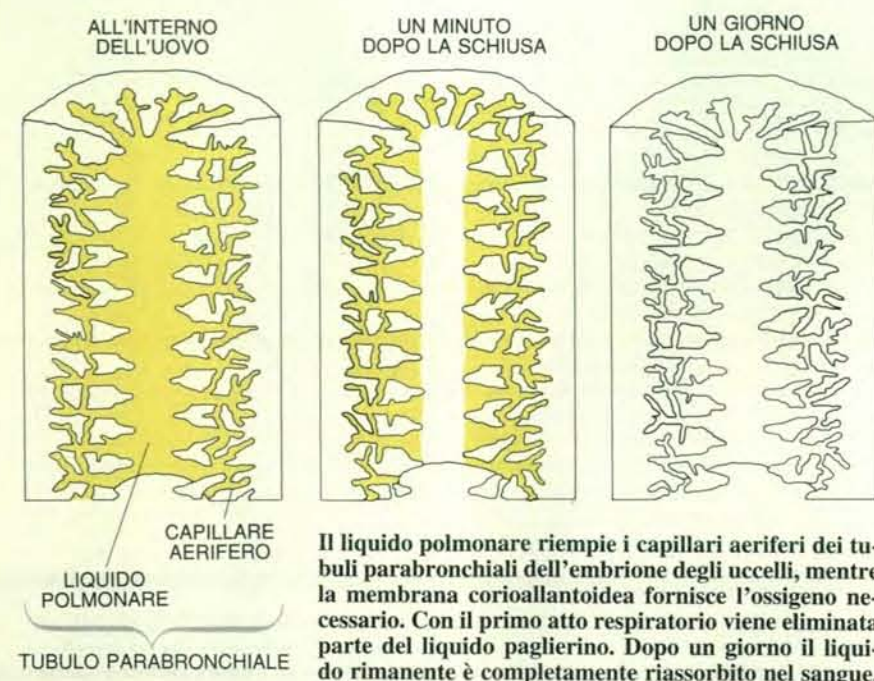
Il pulcino dei megapodiidi può uscire dal guscio con successo senza sviluppare la funzione polmonare dal momento che l'uscita per lui è relativamente facile. A differenza dei piccoli di struzzo che possono impiegare due giorni per uscire dal loro spesso guscio, il pulcino dei megapodiidi può rapidamente e facilmente farsi strada attraverso la parete eccezionalmente sottile. Chiaramente, dopo i primi atti respiratori, gli scambi gassosi sono sufficienti per tenere in vita i piccoli, ma non consentono uno sforzo immediato. In effetti, il pulcino del tacchino di boscaglia resta a riposo per parecchie ore dopo la schiusa, mentre i suoi polmoni si ossigenano.

Sebbene la rottura dell'uovo richieda poca energia, farsi strada nel cumulo è molto arduo. Il pulcino esce dall'uovo a circa 60 centimetri di profondità e deve raggiungere la superficie senza alcun aiuto da parte dei genitori. In laboratorio abbiamo osservato pulcini mentre scavavano verso l'alto in colonne di plastica riempite del materiale che forma il cumulo. Il pulcino si gira sul dorso e usa le robuste zampe per raspare la volta della cavità; lascia che i detriti gli cadano intorno al corpo e poi comprime il materiale con il dorso. I turni di scavo sono spesso interrotti da lunghi periodi durante i quali il pulcino respira affannosamente. L'emersione richiede circa due giorni e mezzo. Misure del consumo di ossigeno eseguite durante questo periodo indicano che il costo energetico dell'operazione è approssimativamente un terzo di quello richiesto complessivamente dai 49 giorni d'incubazione.

L'assenza di cure parentali rende necessaria la completa indipendenza del pulcino. I piccoli dei megapodiidi sono stati descritti come superprecoci: escono dall'uovo con le remiganti primarie complete e alcuni sono in grado persino di volare il primo giorno. Booth ha dimostrato nel mio laboratorio che il tacchino di boscaglia e il fagiano australiano non hanno bisogno di essere riscaldati dai genitori, dal momento che possono mantenere una temperatura corporea costante in ambienti che oscillano da 5 a 45 gradi Celsius subito dopo l'asciugatura del piumaggio.

L'eccezionale maturità alla schiusa è associata a un grosso investimento energetico nell'uovo e a una lunga incubazione. Ci si aspetterebbe che, come gli altri galliformi, le femmine del tacchino di boscaglia, che pesano circa 1800 grammi, depongano uova proporzionali al loro peso e quindi di circa 60 grammi. Le loro uova, invece, pesano 180 grammi, un decimo del peso dell'adulto. Le femmine hanno bisogno da due a cinque giorni per formare queste grosse uova, invece degli uno-due giorni previsti nella maggior parte degli uccelli. Il tuorlo ricco di energia occupa il 50 per cento dell'uovo, rispetto al 40 per cento occupato nelle altre specie precoci e circa il 20 per cento nelle specie non precoci, come pappagalli e pellicani. Le misure, da noi effettuate, del consumo d'ossigeno embrionale indicano che la quantità totale di energia utilizzata nello sviluppo è circa quattro volte superiore a quella richiesta da uova di gallinacei di taglia simile.

Di primo acchito, seppellire uova e lasciarle incubare sembra un metodo prettamente rettiliano. In effetti, alcuni coccodrilli, come il coccodrillo marino (*Crocodylus porosus*), costruiscono cumuli di materiale vegetale e depositano all'interno le loro uova. Ma sebbene la costruzione del cumulo nei megapodiidi fosse considerata un tempo un carattere primitivo, oggi si pensa che essa sia un'evoluzione del comportamento d'incubazione degli uccelli.

Il supporto principale a questa ipotesi è che i pulcini dei megapodiidi possiedono sia il cosiddetto dente dell'uovo sia i muscoli della schiusa sulla parte posteriore del collo, anche se non li usano. Il dente dell'uovo è un cono calcareo situato all'estremità del becco che aiuta la maggior parte dei pulcini a perforare il guscio. I muscoli spingono il capo indie-

Il tacchino di boscaglia emerge con le penne remiganti sviluppate, pronto a badare a se stesso. Nello scavo di un cumulo si sono trovati un piccolo e un uovo chiuso.

tro durante la schiusa e forzano il dente dell'uovo contro la parete del guscio. Nei pulcini dei megapodiidi queste strutture hanno l'aspetto di vestigia di uccelli ancestrali, che presumibilmente ne avevano bisogno mentre si liberavano dalle uova a guscio spesso incubate dai genitori.

Il naturalista australiano H. J. Frith ha proposto una possibile sequenza evolutiva: dagli uccelli tropicali che nidificano direttamente sul terreno e covano le uova a quelli che costruiscono cumuli. Secondo la sua teoria, gli ambienti caldi tropicali dove si originarono i megapodiidi ancestrali probabilmente permisero ai genitori di rimanere lontani dal nido per molto tempo. Durante la loro assenza, i genitori potevano aver preso l'abitudine di ricoprire le uova di terra e lettiera per nasconderle e per aiutarle a mantenere il calore. Se gli uccelli avessero scelto siti riscaldati naturalmente dal sole o dal vulcanismo, avrebbero potuto rimanere lontani dalle uova per periodi assai più lunghi, una tendenza che potrebbe essere culminata nel completo abbandono.

Tuttavia le uova necessitavano di sufficienti provviste di energia e di nutrienti per produrre piccoli capaci di sopravvivere senza cure parentali. Questa esigenza ha selezionato uova grosse e ricche di energia. Con l'indipendenza dal nido, le femmine hanno ampliato la durata del foraggiamento che poteva fornire l'energia e i nutrienti necessari per produrre queste uova.

Quando gli uccelli hanno invaso regioni più fredde come le montagne di isole oceaniche o le foreste temperate dell'Australia, può essere stata necessaria una lettiera più spessa per mantenere le uova al caldo durante l'assenza dei genitori. È facile immaginare che la decomposizione della lettiera abbia fornito in conclusione un po' di calore alle uova e che questo abbia aperto la strada a ulteriori invasioni di habitat più freddi. Per quanto ne sappiamo, non ci sono predatori autoctoni che distruggono il cumulo e divorano le uova.

Una volta che l'incubazione dimostratasi efficace non ha più richiesto la sorveglianza dei genitori, gli adulti sono stati liberi di generare un gran numero di piccoli completamente indipendenti. In una stagione con risorse abbondanti una femmina di tacchino di boscaglia può produrre 50 uova, per un peso totale di nove chilogrammi. Dal momento che il periodo d'incubazione è così lungo e l'intervallo di deposizione è di tre giorni, un uccello di 1800 grammi non sarebbe assolutamente in grado di incubare, covandole, neppure le normali 16 uova di un cumulo.

L'elevata fertilità è probabilmente il principale vantaggio selettivo del comportamento d'incubazione dei megapodiidi, ma a volte è associato a elevata mortalità nel primo anno di vita. Sebbene si conosca poco della storia naturale dei piccoli del tacchino di boscaglia, David Priddel del National Parks and Wildlife Service del Nuovo Galles del Sud ha notato l'elevata mortalità dei piccoli di fagiano australiano causata da fame.

Tuttavia, per quanto possiamo appurare, il tacchino di boscaglia prospera nelle foreste tropicali e, in effetti, è diventato persino fastidioso. Per evitare la fatica di costruire cumuli, alcuni di essi, a quel che si dice, si appropriano dei mucchi di compost (concime costituito da rifiuti domestici e agricoli). Forse per il tacchino di boscaglia questa innovazione rappresenta il prossimo passo evolutivo.

BIBLIOGRAFIA

VLECK D., VLECK C. M. e SEYMOUR R. S., *Energetics of Embryonic Development in the Megapode Birds, Mallee Fowl* Leipoa ocellata *and Brush Turkey* Alectura lathami, in «Physiological Zoology», 57, n. 4, luglio/agosto 1984.

SEYMOUR R. S., VLECK D. e VLECK C. M., *Gas Exchange in the Incubation Mounds of Megapode Birds* in «Journal of Comparative Physiology B», 156, n. 6, novembre 1986.

SEYMOUR R. S., VLECK D., VLECK C. M. e BOOTH D. T., *Water Relations of Buried Eggs of Mound Building Birds* in «Journal of Comparative Physiology B», 157, n. 4, agosto 1987.

SEYMOUR ROGER S. e BRADFORD DAVID F., *Temperature Regulation in the Incubation Mounds of the Australian Brush-Turkey* (Alectura lathami*)* in «The Condor» (in stampa).

Sophie Germain

Matematica di straordinario talento, dovette lottare contro i pregiudizi della società francese del XIX secolo per far riconoscere i risultati che aveva conseguito nella teoria dei numeri e nello studio dell'elasticità

di Amy Dahan Dalmédico

Dopo Ipazia, matematica di Alessandria, linciata dalla folla nel 415 per le sue opinioni religiose e della quale purtroppo non ci è pervenuto alcun lavoro, dovettero trascorrere più di 1300 anni perché le donne riuscissero a conquistarsi un «posto al sole» tra i grandi matematici. Nel 1750 alla studiosa italiana Maria Gaetana Agnesi, nota per i risultati ottenuti nel calcolo differenziale, fu offerta la cattedra di matematica all'Università di Bologna (che rifiutò) e nel 1756 Gabrielle-Emilie, marchesa di Châtelet, tradusse in francese i *Principia Mathematica* di Isaac Newton.

Come Ipazia, la marchesa di Châtelet e l'Agnesi, anche Sophie Germain dovette battersi con fierezza contro i pregiudizi della famiglia, degli amici e dei collaboratori per portare a compimento la sua formazione matematica. Possedeva un talento eccezionale, una grande ambizione e una passione per la scienza che non ammetteva distrazioni. Autodidatta, si interessò alla matematica e alla fisica e produsse lavori originali nei campi della teoria dei numeri e della teoria dell'elasticità. Nonostante i risultati ottenuti, il suo lavoro non ha ancora ricevuto il riconoscimento che merita.

Sophie Germain nacque a Parigi il primo di aprile del 1776, in un'epoca in cui le leggi di Newton governavano il cosmo e i decreti di Luigi XVI la Francia. La Germain era una fautrice dell'innovazione in campo politico e, sostenendo la causa della matematica e della fisica, si trovò a combattere con grande orgoglio per abbattere le barriere che impedivano l'ingresso delle donne nel mondo della scienza.

Il padre, Ambroise-François Germain, apparteneva alla borghesia liberale e colta: i Germain erano da generazioni una famiglia di mercanti e disponevano di abbondanti mezzi finanziari. Per difendere gli interessi familiari, Ambroise si fece eleggere come rappresentante del terzo stato nell'Assemblea Costituente del 1789.

All'età di tredici anni Sophie era descritta come una ragazza timida e goffa. Alle preoccupazioni della sua famiglia, ossessionata dalla politica e dal denaro, reagì rifugiandosi nella biblioteca paterna. La Germain iniziò in modo autonomo gli studi di matematica, leggendo semplicemente tutti i libri che poté trovare. Esattamente come lei non riusciva a capire l'interesse dei suoi genitori per la politica, così questi ultimi non riuscivano a capacitarsi della sua passione per la matematica. Essi ritenevano che tanto interesse per la materia fosse sbalorditivo per la sua età e sconveniente per il suo sesso.

Il matematico italiano Guglielmo Icilio Timoleone Libri, divenuto in seguito amico della Germain, narra com'ella riuscisse a superare le resistenze dei genitori, che volevano che abbandonasse la matematica, studiando al lume di una candela mentre tutta la famiglia dormiva. Nelle notti d'inverno, quando l'inchiostro gelava nel calamaio, leggeva, avvolta nelle coperte. Alla fine la sua determinazione ebbe ragione delle resistenze dei genitori che la sostennero economicamente per tutta la vita nonostante giudicassero «strani» i suoi interessi. Sophie Germain non si sposò né ottenne mai una posizione professionale che le consentisse di mantenersi.

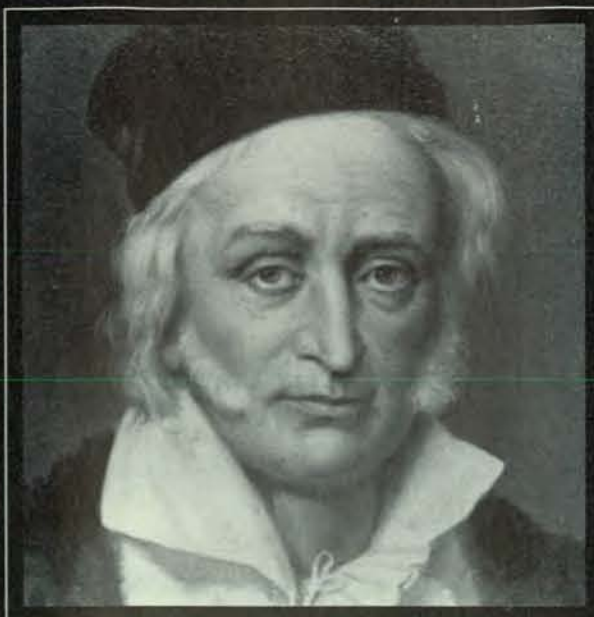
Leggendo di Archimede nella *Histoire des Mathématiques* di Jean-Étienne Montucla, la Germain si identificava con lo scienziato greco che aveva lottato per proseguire le sue ricerche nonostante i romani cingessero d'assedio Siracusa. Passò quindi dal trattato di aritmetica di Étienne Bezout ai lavori di Newton e del matematico svizzero Leonhard Euler.

Parenti, amici e insegnanti non prestarono molta attenzione al talento della giovane Sophie. Essi non vedevano che cosa si potesse ricavare dall'affinamento della mente di una giovane borghese.

Sophie Germain aveva diciannove anni quando fu fondata l'École Polytechnique e riuscì a ottenere gli appunti di molti corsi, tra cui quello di analisi tenuto da Joseph-Louis Lagrange e quello di chimica tenuto da Antoine-François Fourcroy. Durante una sessione, Lagrange chiese agli studenti di esprimere il loro parere sul corso. Temendo che la sua opinione sarebbe stata ignorata, la Germain firmò le sue osservazioni con il nome di uno studente dei corsi precedenti, Antoine-August Le Blanc. (Non sappiamo se quest'ultimo fosse consenziente.)

L'educazione di Sophie Germain seguì una via piuttosto insolita, trattandosi di una donna del suo ceto. Nel XVIII secolo alcune donne dell'aristocrazia ricevevano una preparazione scientifica attraverso opere divulgative scritte appositamente per loro. Le informazioni scientifiche fornite alle donne da queste pubblicazioni avevano il solo scopo di consentire loro di intrattenere conversazioni da salotto su questi argomenti. Francesco Algarotti scrisse uno dei più notevoli libri di questo tipo: *Neutonianismo per le dame*.

Algarotti riteneva che gli interessi delle donne ruotassero solo intorno alla galanteria e all'amore e quindi cercò di impartire i suoi insegnamenti di fisica intrattenendole su tali argomenti. Il suo libro è imperniato sul dialogo tra una marchesa e un suo interlocutore; in una scena l'interlocutore spiega la legge dell'inverso del quadrato, in base alla quale due corpi si attraggono in proporzione inversa al quadrato della distanza tra di

Sophie Germain produsse lavori matematici di alto livello ma, per il fatto di essere una donna di estrazione borghese vissuta ai tempi della Rivoluzione francese, non riuscì mai a ottenere da parte dei colleghi il riconoscimento che meritava. Questa sua statua si trova nel cortile di un liceo parigino a lei dedicato.

Alcuni dei più famosi matematici e fisici del XIX secolo furono amici o rivali della Germain, ma la maggior parte della comunità scientifica la trattò con indifferenza. All'inizio della sua carriera ebbe un intenso carteggio con Carl Friedrich Gauss su questioni di teoria dei numeri. Joseph-Louis Lagrange incoraggiò i suoi studi di fisica e di matematica. Attorno al 1814 entrò in competizione con Siméon-Denis Poisson nel tentativo di elaborare una teoria sull'elasticità. Negli anni della maturità collaborò amichevolmente con Jean-Baptiste-Joseph Fourier, segretario dal 1822 dell'Accademia delle scienze.

essi. La marchesa asserisce che questo concetto le è già familiare. «Non posso fare a meno di pensare che questa proporzionalità... si osservi anche nell'amore: quindi, dopo otto giorni di assenza, l'amore diventa sessantaquattro volte più debole del primo giorno.» Il libro è costellato da digressioni di questo genere che oscurano i pochi passaggi in cui la fisica è spiegata in modo rigoroso.

La Germain non tollerava questa letteratura frivola oltre misura. Andò su tutte le furie quando seppe che Joseph-Jérôme Lalande aveva detto che non sarebbe riuscita a comprendere l'opera di Pierre-Simon Laplace finché non avesse letto il suo volume *L'Astronomie des Dames*. La Germain dichiarò pubblicamente che non avrebbe più rivolto la parola a Lalande.

La sua istruzione avvenne in modo disorganizzato e senza sistematicità. Ebbe occasione di incontrare Lagrange e diversi altri scienziati, alcuni dei quali la sfidavano sottoponendole problemi di relativamente facile soluzione, ma la Germain aspirava a un'istruzione di carattere professionale di cui non le fu mai fornita l'opportunità.

Il suo isolamento non fu decretato solo dalla comunità maschile degli scienziati, ma anche dalle donne più colte della società, dato che la sua nascita borghese non le consentiva la frequentazione dell'aristocrazia. Inoltre non fu mai legata a uno scienziato che la mettesse in contatto con le idee del tempo, una strategia che invece adottarono sia la duchessa di Gotha sia Madame Lalande.

Può darsi che il carattere timido e schivo della Germain, che la induceva a sfuggire alle occasioni mondane, abbia contribuito al suo isolamento. Ella riteneva, come gli enciclopedisti che aveva letto, che i suoi contributi scientifici avrebbero potuto superare, per i loro meriti intrinseci, il vaglio degli scienziati del suo tempo e i pregiudizi sociali.

La Germain fu esclusa dalla comunità scientifica proprio nel periodo in cui questa andava raccogliendo un numero sempre maggiore di adesioni, incoraggiando tra i membri una collaborazione di un'intensità mai registrata in precedenza. Non doveva più studiare al freddo, ma doveva pur sempre scalare una parete di ghiaccio per ottenere riconoscimento al suo lavoro.

All'inizio del XIX secolo la Germain ebbe le sue occasioni più importanti nel campo della teoria dei numeri. Lagrange e Adrien-Marie Legendre erano molto interessati all'argomento e la incoraggiarono ad approfondirlo.

Nel corso di diversi anni arrivò a una comprensione profonda dei metodi presentati nelle *Disquisitiones Arithmeticae* da Carl Friedrich Gauss. Stimolata da questo libro, la Germain scrisse allo stesso Gauss, tra il 1804 e il 1809, una dozzina di lettere che firmava con lo pseudonimo «Le Blanc» perché temeva «il ridicolo inevitabilmente associato alla condizione di donna studiosa».

Nella sua prima lettera a Gauss, la Germain discute l'equazione di Fermat, ossia

$$x^n + y^n = z^n$$

dove x, y, z e n sono numeri interi. Pierre de Fermat riteneva di poter dimostrare che l'equazione non aveva soluzioni per valori di n maggiori di 2. Fino a oggi questa congettura, nota come ultimo teorema di Fermat, non è stata dimostrata (si veda l'articolo *L'ultimo teorema di Fermat* di Harold M. Edwards in «Le Scienze» n. 124, dicembre 1978).

La Germain scoprì che l'equazione di Fermat non è risolvibile quando n è uguale a $p - 1$, dove p è un numero primo della forma $8k + 7$. (Per esempio, se k è uguale a 2, allora p è un numero primo, e precisamente 23, e n è 22.) Quindi spiegò la sua dimostrazione a Gauss, osservando che «Sfortunatamente, la profondità del mio intelletto non uguaglia la voracità del mio appetito, e mi sento un po' temerario a disturbare un uomo di genio quando non ho altri titoli per pretendere la Sua attenzione che l'ammirazione, necessariamente condivisa da tutti i suoi lettori».

Gauss rispondeva così: «Mi compiaccio profondamente che l'aritmetica abbia trovato in voi un cultore così abile. La vostra nuova dimostrazione... è molto bella, sebbene sembri applicarsi a un caso isolato e non possa generalizzarsi ad altri numeri.»

Nel 1806 la Germain fece pervenire un messaggio a Gauss tramite Joseph-Marie Pernety, un ufficiale dell'esercito suo amico. Era preoccupata della sorte di Gauss, dato che Napoleone aveva proprio allora conquistata gran parte della Prussia. Disse a Pernety che temeva che Gauss potesse andare incontro alla medesima sorte di Archimede, ucciso dai romani. Pernety mandò un messaggero per informarla del fatto che Gauss stava bene, ma non conosceva alcuna Sophie Germain. Nella sua lettera successiva a Gauss, Sophie Germain, *alias* Le Blanc, rivelò la sua vera identità.

Gauss ne rimase sorpreso e ammirato. «Una donna, a causa del suo sesso e dei nostri pregiudizi, incontra molti più ostacoli di un uomo nel familiarizzarsi con problemi complessi. Tuttavia, quando supera queste barriere e penetra nelle profondità più recondite, rivela di possedere il coraggio più nobile, un talento straordinario e un genio superiore.» Le lodi di Gauss erano sincere, come rivelano le lettere che egli inviò all'astronomo tedesco Heinrich W. M. Olbers.

Nel 1808 la Germain scrisse a Gauss descrivendogli quello che si sarebbe rivelato il suo contributo più brillante alla teoria dei numeri. Ella dimostrò che se x, y e z sono numeri interi e se

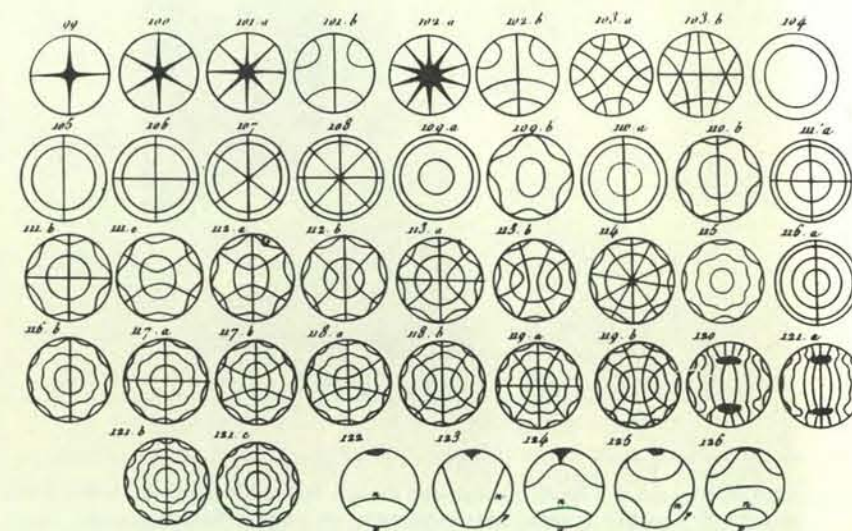
$$x^5 + y^5 = z^5$$

allora o x o y o z deve essere divisibile per 5. Questo teorema è stato utile per la dimostrazione del teorema di Fermat nel caso in cui n sia uguale a 5.

Gauss non fece alcun commento su questo risultato. A quel tempo era stato da poco nominato professore presso l'Università di Gottinga e aveva abbandonato i suoi studi di teoria dei numeri, logorato da questioni di carattere professionale e personale.

Questo teorema rimase dunque in gran parte sconosciuto. Nel 1823 Legendre lo cita in un articolo in cui descrive la sua dimostrazione dell'ultimo teorema di Fermat nel caso in cui n sia uguale a 5. (Nel 1676 Bernard Frénicle de Bessy aveva dimostrato il teorema per n uguale a 4; nel 1738 Euler l'aveva risolto per n uguale a 3.) Nel periodo compreso tra il 1738 e i lavori di Ernst E. Kummer nel 1840, il teorema di Sophie Germain emerge come il risultato più notevole in relazione all'ultimo teorema di Fermat.

Sophie Germain si affidava alla guida di Gauss nelle sue ricerche di teoria dei numeri. Quando la loro corrispondenza si interruppe, ella cercò nuovi problemi e nuove guide. Nel 1809 si imbatté in una sfida che avrebbe ispirato alcuni dei suoi lavori migliori. Infatti si impegnò a fondo nel tentativo di spiegare gli esperimenti di Ernst F. F. Chladni sulle vibrazioni delle superfici elastiche.

Gli esperimenti di Chladni consistevano nel versare sabbia fine su una lastra di vetro e nel mettere in vibrazione la lastra strofinandone il bordo con un archetto. La sabbia rimbalzava lontano dalle regioni in vibrazione per accumularsi nei «nodi», i luoghi dei punti che restavano immobili. Dopo alcuni secondi la lastra si ricopriva di una serie di curve composte da granelli di sabbia, disposte secondo affascinanti schemi simmetrici: cerchi, stelle e altre figure geometriche. Le caratteristiche delle confi-

Le figure di Chladni si formano quando una superficie ricoperta di sabbia viene messa in vibrazione. La sabbia si accumula lungo linee che corrispondono ai punti in cui le vibrazioni sono più deboli. Sophie Germain contribuì in modo significativo alla formulazione di una teoria matematica che spiegasse questo fenomeno. Questa figura è tratta dall'edizione del 1809 del *Traité d'Acoustique* di Ernst F. F. Chladni.

gurazioni che venivano a formarsi dipendevano dalla forma della superficie, dalla collocazione dei suoi sostegni e dalla frequenza della vibrazione.

Durante una visita a Parigi nel 1808, Chladni presentò i suoi esperimenti ai sessanta matematici e fisici che facevano parte della Prima classe (o Accademia delle scienze) dell'Istituto di Francia. Gli esperimenti di Chladni colpirono a tal punto gli scienziati che essi gli chiesero di ripeterli al cospetto di Napoleone, il quale propose che l'Accademia conferisse una medaglia d'oro a chi fosse riuscito a elaborare una teoria capace di spiegare gli esperimenti di Chladni. Nel 1809 la Prima classe bandì il concorso stabilendo il termine di due anni per la consegna dei lavori.

La Germain afferrò al volo questa opportunità. Per più di un decennio si sarebbe dedicata all'elaborazione di una teoria dell'elasticità, competendo o collaborando con alcuni dei matematici e dei fisici più famosi e sentendosi orgogliosa di dare il suo contributo allo studio di un problema che esplorava le frontiere della scienza del XIX secolo.

Tuttavia la Germain rimase, nonostante tutto, un'estranea nel mondo della scienza. L'etichetta richiedeva che dovesse procurarsi una lettera d'invito ogni volta che voleva far visita a un'istituzione e che l'ospite dovesse fornire trasporto e accompagnamento. Queste formalità erano un ostacolo al suo desiderio di discutere liberamente con gli altri scienziati. Di conseguenza incontrò parecchie difficoltà nel passare dalla teoria dei numeri all'argomento dell'elasticità.

Per dedicarsi alla teoria delle vibrazioni la Germain intraprese lo studio di opere come *Mécanique Analytique* di Lagrange e i saggi di Euler sulle vibrazioni delle barre elastiche. Ella cercò di spiegare il comportamento delle superfici elastiche applicando il metodo di Euler. Questi aveva ipotizzato che una forza applicata a una barra fosse contrastata da una forza elastica interna a essa, proporzionale in ogni punto della barra alla curvatura della medesima. I saggi di Euler indussero la Germain a formulare un'ipotesi analoga. Ella propose che in ogni punto di una superficie la forza elastica fosse proporzionale alla somma delle curvature principali della superficie in quel punto. Le curvature principali sono il valore massimo e il valore minimo della curvatura tra tutte le curve che si originano da sezioni della superficie.

Nel 1811 Sophie Germain era l'unica concorrente, ma il suo lavoro non ottenne il premio. Infatti non aveva ricavato le sue ipotesi da principi fisici né avrebbe potuto farlo a quel tempo, dato che le mancavano le conoscenze necessarie di analisi e di calcolo variazionale.

Tuttavia il suo lavoro aprì nuove prospettive. Lagrange, che faceva parte della giuria, corresse gli errori contenuti nei calcoli della Germain e ottenne un'equazione che sembrava poter descrivere le figure di Chladni. Secondo Lagrange, se z è l'ampiezza della vibrazione e se z è piccolo, allora

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + k^2 \left[\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} + \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} \right] = 0$$

dove t è il tempo, k è una costante di richiamo dovuta alla forza elastica e x e y rappresentano punti della superficie.

Nel 1811 la Prima classe prorogò i termini del concorso, e di nuovo la Germain fu l'unica concorrente. Dimostrò che l'equazione di Lagrange spiegava le figure di Chladni in diversi semplici casi, ma non fu in grado di escogitare una derivazione soddisfacente dell'equazione di Lagrange da principi fisici. Per questo lavoro ottenne una menzione onorevole da parte dell'Accademia.

Più o meno in quel periodo Siméon-Denis Poisson iniziò a invadere il territorio di ricerca della Germain, diventando alla fine il suo principale oppositore. L'approccio di Poisson al tema dell'elasticità, in forte contrasto con l'esperienza di Sophie Germain, era caratterizzato dall'impiego di tutte le risorse allora disponibili.

Poisson era entrato all'École Polytechnique nel 1798, a diciassette anni. Lagrange e Laplace non avevano potuto far a meno di osservare le sue capacità d'astrazione e la sua bravura nel risolvere problemi. Con l'aiuto di Laplace, Poisson fece una rapida carriera, divenendo professore all'École Polytechnique e presso la Facoltà di scienze di Parigi. Frequentò la famosa Société d'Arcueil, dove scienziati tra i più famosi discutevano ed effettuavano nuovi esperimenti. Laplace e Claude-Louis Berthollet erano alla guida della società e Poisson ne era il consigliere per le questioni matematiche. Nel 1812 Poisson, introdotto nel nucleo della comunità scientifica, entrò a far parte della Prima classe.

Poisson tentò di spiegare le vibrazioni delle superfici elastiche applicando il modello fisico newtoniano. Il suo punto di partenza era l'idea che una superficie consista di molecole soggette a interazioni attrattive e repulsive. In seguito adottò una serie di assunzioni che potevano sembrare plausibili, derivò una formula estremamente complicata e, dopo averla semplificata, arrivò all'equazione di Lagrange. Alla luce delle conoscenze attuali, le assunzioni di Poisson sembrano assurde e bisogna ammettere che il successo che ottenne nella derivazione dell'equazione di Lagrange era da attribuire sostanzialmente ai precedenti lavori di Sophie Germain e di Lagrange.

Nel 1814 Poisson pubblicò il suo articolo sulle superfici elastiche. Come accademico non poteva concorrere al premio, ma molti dei suoi colleghi ritennero che avesse elaborato una teoria capace di spiegare il meccanismo fisico che produceva le figure di Chladni. Tuttavia il premio non fu ritirato.

«Ho rimpianto fortemente di non essere stata a conoscenza della memoria di Poisson» scrisse la Germain in un saggio sull'elasticità nel 1815. «Ho perso molto tempo per me prezioso in attesa della pubblicazione.» In questo articolo ella attaccava il metodo di Poisson cercando di sostenere le proprie tecniche di indagine sull'elasticità. La Germain postulava che la forza elastica fosse proporzionale alla forza applicata, che a sua volta era legata alla deformazione della superficie. La forza in un punto è proporzionale alla somma di tutte le curve passanti per quel punto. Dimostrò quindi che la somma di tutte le curve si riduce alla somma della curvatura massima e della curvatura minima. Infine derivò l'equazione di Lagrange dalla somma delle curvature principali.

Questo saggio fu il terzo contributo fornito dalla Germain in occasione di questo concorso, i cui giudici erano allora Adrien-Marie Legendre, Laplace e Poisson. Essi non poterono accettare il suo postulato in base al quale l'effetto, ossia la deformazione, è necessariamente proporzionale alla causa, cioè alla forza applicata. In realtà dovevano passare decenni prima che si trovasse una spiegazione. Con questa riserva i giudici le conferirono il premio della Prima classe, ma la Germain non partecipò alla cerimonia di premiazione. Forse pensava che i giudici non avessero apprezzato del tutto il suo lavoro, o forse preferiva non apparire in pubblico.

Per la Germain il premio rappresentava un riconoscimento ufficiale, che le avrebbe dato autorità, ma la comunità scientifica non le dimostrò quel rispetto che avrebbe meritato. Poisson presentò in modo laconico e formale i suoi risultati, evitando di discuterli con lei e ignorandola pubblicamente. Se pochi anni prima la Germain si immaginava come un essere minuscolo in una compagnia di giganti, ora non provava più alcuna ammirazione per i suoi colleghi.

Il suo spirito fu presto risollevato da una nuova amicizia, quella con Jean-Baptiste-Joseph Fourier. Li univa la disistima per Poisson, la cui ostilità aveva interferito con le carriere di entrambi. La Germain, grazie a Fourier, iniziò a seguire le attività della comunità scientifica parigina. Frequentò le sedute dell'Accademia delle scienze, prima donna a parteciparvi a titolo personale e non in qualità di moglie di un membro.

A partire dal 1820 intraprese un ambizioso progetto per migliorare le sue dimostrazioni e i suoi contributi alla teoria dei numeri, collaborando alla pari con Legendre. Inoltre pubblicò una revisione della sua teoria dell'elasticità. Si interessò a diversi campi della scienza partecipando alla vita sociale dell'élite intellettuale. La sua curiosità e il suo fascino erano apprezzati universalmente.

Sebbene Sophie Germain abbia certamente prodotto lavori degni di un riconoscimento accademico, non ne ebbe mai alcuno. Nel 1830 Gauss non riuscì a convincere l'Università di Gottinga a conferirle la laurea *honoris causa*.

Sophie Germain morì di cancro il 27 giugno del 1831 all'età di 55 anni, dopo due anni di malattia. Prima di morire abbozzò un saggio filosofico rimasto incompiuto e pubblicato postumo col titolo *Considérations générales sur les Sciences et les Lettres*. In esso cercava di identificare i processi intellettuali che accomunano tutte le attività umane. Ella riteneva che l'universo intellettuale fosse colmo di analogie e che lo spirito umano, riconoscendole, potesse guidarci alla scoperta dei fenomeni e delle leggi naturali. Una visione che spiega la tenacia con cui questa autodidatta perseguì la sua osteggiata vocazione.

TANGENTE
RAGGIO DI CURVATURA
CURVA
CURVA MINIMA
CURVA MASSIMA
RAGGI DI CURVATURA
SUPERFICIE

Il concetto di curvatura è fondamentale nel lavoro di Sophie Germain sulla teoria dell'elasticità. È possibile approssimare strettamente una curva, in ogni suo punto, mediante una circonferenza che condivida con la curva una tangente nel punto in questione. La curvatura è pari all'inverso della lunghezza del raggio che unisce il centro della circonferenza al punto di tangenza. Nel caso di una superficie, la curvatura in un suo punto è correlata alla curvatura delle curve che si ottengono tagliando la superficie con piani perpendicolari in quel punto. Tra tutte queste curve, quelle di curvatura massima e di curvatura minima sono dette curve principali.

I salotti del XIX secolo erano forse le sole istituzioni in cui fosse socialmente accettato che le donne partecipassero a discussioni riguardanti le grandi scoperte scientifiche e i fatti di attualità. Sophie Germain lottò per essere ammessa a istituzioni scientifiche e società in cui potesse discutere seriamente le sue teorie. Questa scena, dipinta da Isidore Pils nel 1849, raffigura un salotto dell'epoca a Strasburgo.

BIBLIOGRAFIA

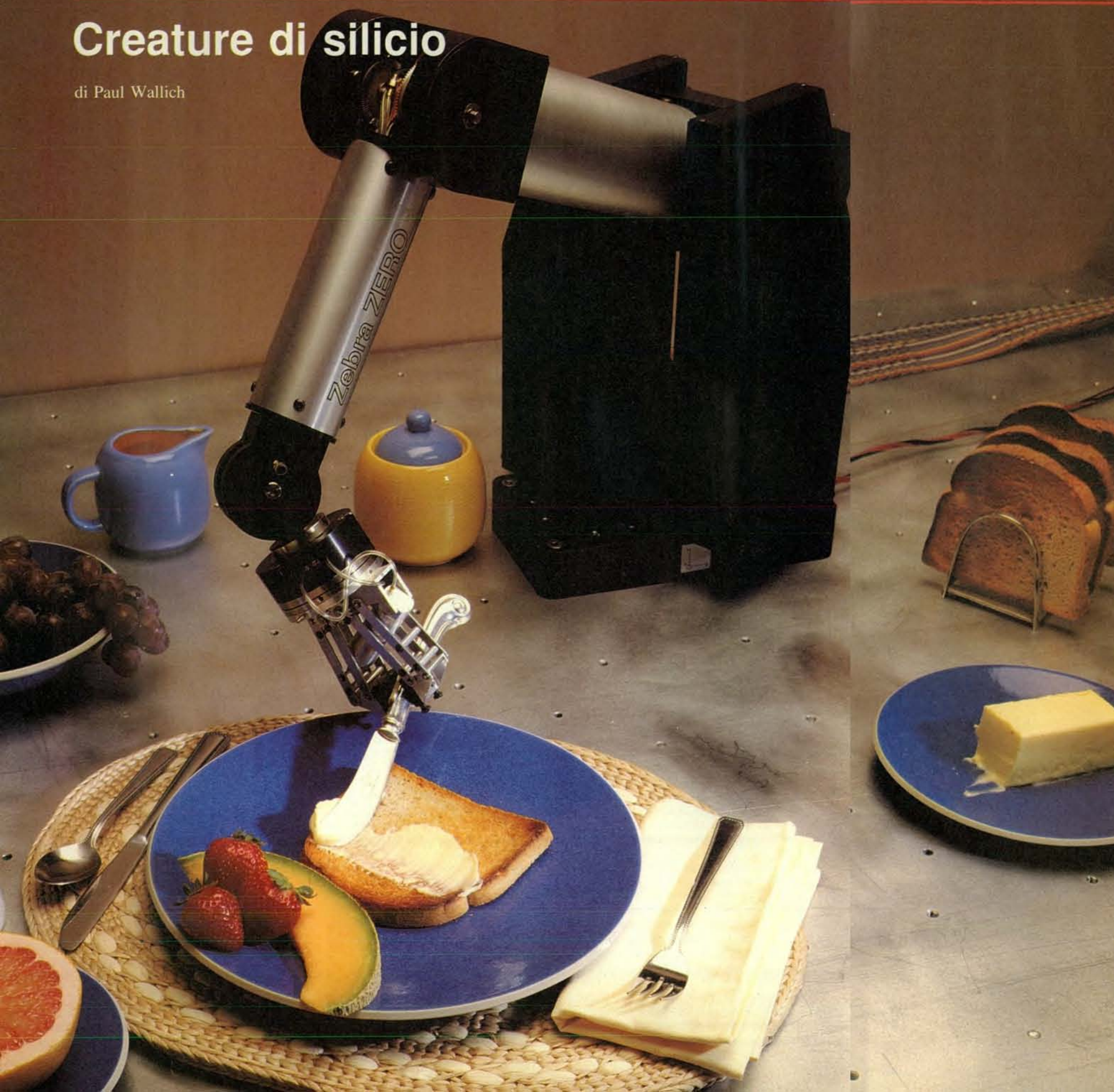
GERMAIN SOPHIE, *Examen des principes qui peuvent conduire à la connaissance des lois de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques* in «Annales de chimie et de physique», serie 2, 38, pp. 123-131, 1828.

BUCCIARELLI LOUIS L. e DWORSKY NANCY, *Sophie Germain: An Essay in the History of the Theory of Elasticity*, D. Reidel Publishing Company, 1980.

DAHAN-DALMÉDICO AMY, *Mécanique et théorie des surfaces: les travaux de Sophie Germain* in «Historia Mathematica», 14, n. 4, pp. 347-365, novembre 1987.

DAHAN DALMÉDICO AMY, *Étude des méthodes et des «styles» de mathématisation: la science et l'élasticité* in *Sciences à l'époque de la Révolution*, Librairie Blanchard, Parigi, 1988.

Creature di silicio

di Paul Wallich

Gli scienziati stanno cercando di costruire macchine in grado di emulare l'intelligenza e la coscienza dell'uomo, ma per ora l'abilità di questi prototipi a destreggiarsi nel mondo reale non raggiunge quella di un moscerino.

Scrr Trr Cric. Crac. Crr. Un robot sta imburrando una fetta di pane tostato e, considerato che sta ancora imparando, non se la cava poi tanto male.

Per noi imburrare il pane è un'azione semplicissima, ma per una macchina è un esercizio molto arduo. Esso infatti compendia una vastissima categoria di compiti che le macchine dovranno imparare a svolgere per «potersela cavare» nel mondo reale. Un robot convenzionale, che non sa fare altro che spostare la sua pinza lungo un percorso ben determinato, con pane e burro farebbe quasi di sicuro un disastro.

Per imburrare il pane è necessario modificare le azioni con continuità sulla base della retroazione sensoriale: resistenza eccessiva, allenta la pressione; resistenza scarsa, modifica l'angolo del coltello. E così via. Se si volesse calcolare esattamente il procedimento prima dell'esecuzione, bisognerebbe misurare con precisione la viscosità del burro e della superficie del pane, costruire un modello non lineare degli elementi finiti della spalmatura e lavorare per ore e ore su un supercalcolatore Cray.

Questo robot sperimentale del laboratorio di Stanley J. Rosenschein alla Teleos Research di Palo Alto, in California, fa parte di una nuova stirpe di macchine che rappresentano il fronte più avanzato della ricerca in intelligenza artificiale (IA). A differenza dei sistemi di IA che sfruttano vasti depositi di conoscenze esoteriche, come i sistemi esperti, le macchine di questa schiatta nascente dovrebbero agire con capacità percettive ed essere dotate di buon senso. Si sta tentando di far progredire nelle macchine non solo le capacità visive e percettive, ma anche il ragionamento automatizzato, la pianificazione, la rappresentazione delle conoscenze e la comprensione del linguaggio naturale.

Queste sono le sottodiscipline in cui si divise l'intelligenza artificiale una generazione fa, quando si capì che, per costruire un calcolatore che si potesse considerare intelligente, la semplice programmazione non bastava. Poi, due anni fa, Allen Newell, della Carnegie Mellon University, uno dei pionieri dell'IA, lanciò un appello affinché i ricercatori riunificassero il dominio al fine di costruire quelli che lui chiamava «sistemi intelligenti integrati». La validità dimostrata dalle varie componenti dell'IA, sosteneva Newell, sarebbe bastata per costruire una totalità.

In risposta, racconta Newell, «dall'arsenale emersero un sacco di personaggi interessanti». Molti di costoro già lavoravano a «veicoli autonomi» o ad «agenti intelligenti» o ad altre cose strane. Il loro obiettivo comune era di costruire non soltanto calcolatori «in gamba», ma creature meccaniche capaci di funzionare nel mondo in modo indipendente.

Un robot sensibile alla pressione riesce a spalmare il burro, ma non a fare colazione. L'interazione col mondo è un problema in gran parte non risolto per le macchine che aspirano ad avere un'intelligenza di tipo umano o una certa autocoscienza.

Come non si imburra il pane

I problemi fondamentali che quanti hanno risposto all'appello di Newell devono affrontare sono due: primo, tra i ricercatori non c'è accordo su che cosa sia il comportamento intelligente e, in secondo luogo, essi si dividono in almeno due partiti principali quanto al problema di come passare dallo stadio attuale all'intelligenza vera e propria, qualunque cosa essa sia. I ricercatori di IA tradizionale, come Newell, credono nel ragionamento, nell'apprendimento e nell'elaborazione simbolica. Nutrono la fiduciosa convinzione che, con algoritmi più raffinati e con un hardware più veloce, prima o poi si otterranno macchine intelligenti. Sull'altro versante i «giovani turchi», come Rodney A. Brooks del Massachusetts Institute of Technology, evitano a ogni costo tutto ciò che possa somigliare alla razionalità e progettano creature meccaniche funzionanti unicamente in base ai riflessi.

Anche se tra i ricercatori di IA esistesse una convergenza di opinioni (ipotesi che gli interessati considerano umoristica), riunificare l'intelligenza artificiale non sarebbe facile. Oggi i sistemi esperti risolvono miriadi di problemi, dall'individuazione dei guasti nei motori alla valutazione dell'affidabilità di una banca di medie dimensioni. Pianificatori automatici possono programmare la manutenzione di aerei e contribuire al progetto di catene di montaggio. I sistemi per il linguaggio naturale riescono a fare l'analisi logica di gran parte delle frasi come la farebbe una persona. Ma l'esperienza dimostra che non basta combinare moduli relativi a diverse discipline affinché essi lavorino insieme senza intoppi.

A un recente convegno, riferisce Kenneth D. Forbus della Northwestern University, i costruttori di «creature» parlarono in termini ottimistici di una macchina autonoma capace di svolgere svariati compiti e di sopravvivere nel mondo, senza assistenza, per un anno. «Allora mi misi a chiedere a tutti: "quanto può durare il vostro sistema?"».

Il risultato fu che nessuno aveva ancora costruito qualcosa che sopravvivesse più di poche ore. Le cause di morte sono varie quanto le macchine stesse. A volte, dice Forbus, il software s'inceppa, a volte sono le batterie che si esauriscono. Nella maggioranza dei casi, tuttavia, un sistema si caccia semplicemente in un pasticcio da cui né il ragionamento né i servomotori riescono a tirarlo fuori: per esempio s'incastra sotto una sedia.

Detto senza mezzi termini, i ricercatori di sistemi intelligenti integrati non hanno ancora costruito una macchina che abbia le capacità di sopravvivenza di un moscerino, e tanto meno la perizia sensoriale e di comportamento per poter trovare un altro moscerino con cui accoppiarsi. Il motivo per cui i moduli prodotti dalle varie sottodiscipline dell'IA non funzionano bene insieme è che i ricercatori che li hanno costruiti hanno risolto problemi che altri specialisti non si

Rappresentazione delle conoscenze

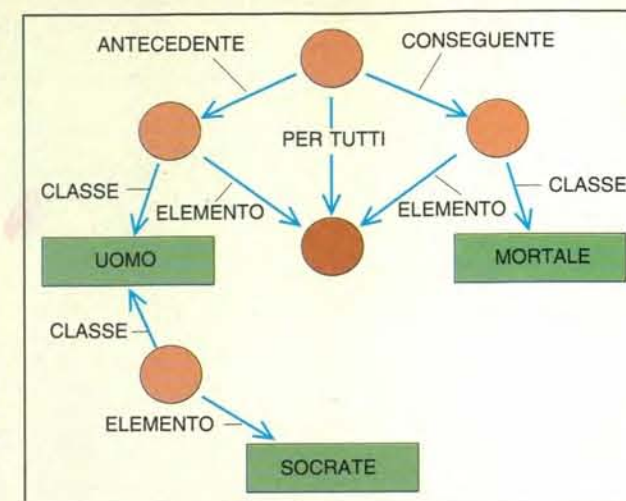
Di solito i programmi di intelligenza artificiale rappresentano le loro conoscenze sotto forma di proposizioni logiche in un linguaggio di programmazione specializzato. Alcune proposizioni sono fatti elementari: (HA TITTI ALI) (È TITTI UCCELLO), mentre altri, solitamente detti regole, codificano le informazioni relative alle connessioni: (IMPLICA (AFFAMATO DUMBO) (SCOPO DUMBO (E (POSSEDERE DUMBO ?X) (COMMESTIBILE ?X) (MANGIARE DUMBO ?X))) [approssimativamente traducibile come: «Se Dumbo ha fame, vuole possedere qualcosa che sia commestibile e mangiarlo.»].

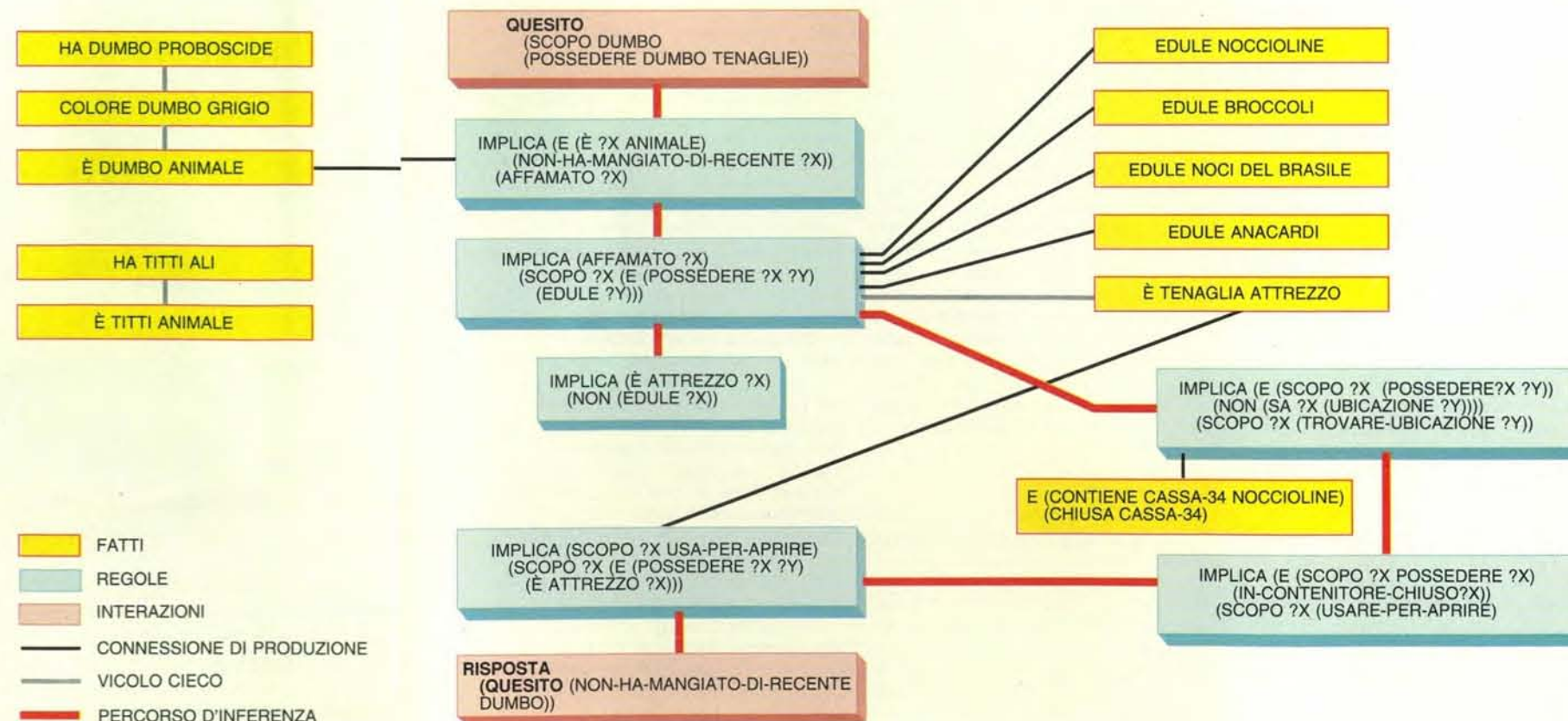
Un «motore inferenziale» reagisce alle proposizioni nuove cercando nella base di conoscenze fatti ulteriori a partire dalle regole e dai fatti esistenti. Così, se fosse informato che Dumbo in effetti ha fame, il sistema asserirebbe che Dumbo ha gli scopi giusti. Quindi, il sistema potrebbe cercare nella propria base di conoscenze oggetti commestibili ed enunciare che Dumbo vuole possederne e mangiarne uno.

Il ragionamento che va dalle conoscenze e dalle regole a conoscenze nuove è di solito chiamato concatenazione progressiva. I sistemi inferenziali possono anche procedere per concatenazioni regressive, ossia partire da conoscenze esistenti per arrivare alla risposta a un quesito. Per esempio, richiesto se Dumbo desideri un paio di tenaglie, il sistema vede che aver fame può essere un motivo per desiderare il possesso di un oggetto e quindi controlla se Dumbo ha fame e se le tenaglie sono commestibili. Se uno di questi due fatti non è vero, il sistema continua a cercare altre regole da cui prima o poi segua (SCOPO DUMBO (POSSEDERE DUMBO TENAGLIA)).

Codificare i fatti e le azioni è una faccenda complicata. Consideriamo il problema della «gravità annegata»: un ricercatore che si occupava di comprensione del linguaggio naturale tentò di rappresentare il concetto di caduta e tradusse «X cadde» con «la gravità portò X verso il basso». In un altro punto del suo sistema c'era la regola secondo la quale chi cade in un fiume e non sa nuotare e non ha amici pronti a salvarlo annega. La gravità, essendo una forza naturale, non ha né braccia né gambe né amici, perciò va incontro a quest'amara e improbabile fine.

Altri fatti - per esempio «i pesci nuotano» - in realtà non sono per niente fatti, e quindi il tentativo di codificarli è fonte di infiniti guai: alcuni pesci camminano sulle pinne, altri sono fritti. Per trarre deduzioni automatiche in presenza di incertezze ed errori, si ricorre al «ragionamento in difetto di specifiche contrarie» (come «i pesci di solito nuotano») e all'«inferenza non monotona» (ritrattazione di qualsiasi conclusione basata sulla premessa che un pesce particolare nuoti). Queste due tecniche, tuttavia, hanno fornito risultati di valore alterno.

Se gli oggetti contenuti in una base di conoscenze hanno tra loro relazioni complesse, come peraltro accade normalmente, spesso i ricercatori ricorrono alle rappresentazioni basate sulle reti semantiche (*in alto a destra*). Queste reti comprendono nodi, che rappresentano gli oggetti

in questione, e rami, che rappresentano le connessioni tra i nodi. I collegamenti possono denotare relazioni semplici, come È-UN o PARTE-DI, o relazioni più complesse, come AVENTE-DIRITTO-A, CREDE o OPERA-SU. Per dedurre informazioni su un determinato oggetto della rete semantica, basta che il programma segua i collegamenti giusti.

Per imitare certi comportamenti cognitivi umani, come l'associazione libera, le reti semantiche possono anche usare una tecnica chiamata attivazione propagantesi. L'attivazione propagantesi consiste nell'emissione di segnalatori dai nodi che rappresentano oggetti o concetti particolari. Quando i segnalatori uscenti da nodi diversi s'incrociano, i cammini che risalgono ai nodi predecessori rappresentano una catena di associazioni tra i due oggetti.

Rodney A. Brooks del MIT e il suo spensierato amico Gengis sono tra i principali assertori della tesi secondo cui al comportamento intelligente non serve la ragione.

erano posti, mentre hanno in gran parte ignorato questioni che oggi appaiono d'importanza cruciale per l'intelligenza integrata. Per esempio, dice Thomas M. Mitchell della Carnegie Mellon, il paradigma che sta alla base di quasi tutti gli algoritmi per la visione artificiale è errato: «Gran parte dello sforzo è volto a far interpretare al programma una (singola) figura» e a fargli identificare gli oggetti che contiene. Ma le creature artificiali che si spostano nel mondo devono interpretare un flusso di immagini, ciascuna solo lievemente diversa dalla precedente. Inoltre devono preoccuparsi meno dell'identità di un oggetto che della necessità di non urtarlo.

Benché i sistemi per la visione artificiale siano già usati nei robot in commercio, finora gli specialisti del settore hanno in gran parte ignorato il problema della visione per le macchine mobili. Mitchell, per esempio, ritiene che certi problemi, dalla visione binoculare all'identificazione di oggetti di forma ambigua, possano essere risolti semplicemente dotando di movimento gli occhi di un robot anziché aumentando la potenza di calcolo. Mitchell cita Dana H. Ballard, dell'Università di Rochester, che con le sue ricerche sulla «visione animata» ha dimostrato che molti algoritmi per l'elaborazione di immagini si possono semplificare enormemente tenendo conto del fatto che le creature possono spostare la testa e fissare entrambi gli occhi sull'oggetto della loro attenzione.

Poi c'è il problema posto dai cosiddetti sistemi per il mantenimento della verità e per il ragionamento in difetto di specifiche contrarie, che affrontano i casi in cui le informazioni sono incerte o contraddittorie. Si consideri per esempio l'enunciato: «Gli uccelli volano». Ciò è vero, come ha osservato tra gli altri Marvin L. Minsky del MIT, a meno che gli uccelli in questione non siano pinguini, struzzi, moa o dodi, o a meno che non abbiano le ali mozze o non siano imprigionati in gabbie troppo piccole, o a meno che non siano morti e inchiodati a un palo, o a meno che non abbiano subito un condizionamento psicologico a restare a terra quando erano pulcini e così via. Invece di riflettere turbinosamente per tentare di stabilire a priori se un dato uccello vola, dice Mitchell, «per decidere se Titti è capace di volare il robot può semplicemente dargli un'occhiata».

Attila l'insettoide

Brooks è l'esponente più in vista della fazione che vuole gettare nella pattumiera della storia la visione artificiale, il mantenimento della verità e quasi tutto il resto dell'IA. Costoro sostengono che le sue varie sottodiscipline hanno in sostanza cercato sotto il lampione, privilegiando interi settori di ricerca per la loro trattabilità o eleganza concettuale piuttosto che per la loro utilità. In articoli intitolati *Intelligence without Reason* o *Elephants Don't Play Chess*, egli sostiene che alle macchine progettate per vivere nel mondo la logica sopraffina e le tecniche per la rappresentazione delle conoscenze predilette dagli specialisti di IA non servono a nulla.

Brooks affida invece le sue speranze a quella che chiama «architettura della sussunzione» in cui i comportamenti complessi, come l'esplorazione dell'ambiente, sono ricondotti a comportamenti semplici, come lo spostamento di un arto. L'architettura della sussunzione è ampiamente basata sulla natura del mondo esterno più che su un articolato ragionamento mirante a strutturare le azioni del robot. Se, per esempio, il robot incontra un ostacolo, è importante che lo aggiri, non che stabilisca come questo gli sia capitato davanti. Non serve neanche che il robot ricordi che lì c'è un ostacolo, dato che saprà riconoscerlo benissimo anche la volta dopo. Questa rappresentazione procedurale delle conoscenze, dice la ricercatrice Pattie Maes del MIT, evita il vicolo cieco che s'incontra nell'IA tradizionale quando si cerca di costruire e mantenere un modello logico coerente del mondo esterno. «È troppo difficile - dice la Maes - costruire la corrispondenza tra percezione e rappresentazioni interne.»

Attila e Annibale, i robot insettoidi di Brooks, contengono microunità di elaborazione multiple e funzionano tramite uno stretto accoppiamento ad anello tra sensori, elaboratori e attuatori (si veda la rubrica «L'angolo matematico» in «Le Scienze» n. 277, settembre 1991). Le gambe, per esempio, per buona parte del tempo eseguono un programma che ne verifica la posizione e le mantiene ferme. Se le condizioni sono tali da avviare la marcia, un elaboratore centrale invia alle gambe il segnale di «marcia», ma non ne coordina i movimenti: i singoli programmi inseriti in ciascuna gamba sono indipendenti. La Maes sostiene che il «comportamento emergente» da questi processi paralleli può imitare ciò che accade in realtà nel cervello meglio che non l'ipotesi della «psicologia popolare» secondo cui esiste una mente cosciente centrale che coordina tutto.

Per quanto sembri semplice, la sussunzione può generare un'attività piuttosto complessa. Uno dei robot progettati dal gruppo frugava nei corridoi del Laboratorio di intelligenza artificiale del MIT cercando lattine di gassosa (almeno una volta, secondo il rapporto pubblicato) senz'avere alcuna idea esplicita del proprio operato. Il modulo di «avvicinamento» accostava la pinza del robot a tutto ciò che avesse forma di lattina e la pinza si chiudeva ogni volta che qualcosa si trovasse tra le sue ganasce.

Brooks ha avanzato l'ipotesi che minuscoli robot mobili, di peso non superiore a un chilogrammo, potrebbero eseguire certi compiti, come l'esplorazione del suolo di un pianeta lontano (o anche del nostro), meglio di sistemi più grandi e individualmente più affidabili.

Lavorando in questo senso, Maja Mataric del MIT ha progettato un modulo di software che genera una mappa dello spazio in cui si trova il robot secondo il concetto di sussunzione. Invece della solita struttura di dati contenente gli oggetti e la loro posizione, o una visione del mondo fornita dai sensori del robot, la mappa basata sulla sussunzione è costituita da un insieme di piccoli processi di calcolo, attivati uno per ciascun luogo «interessante» del mondo del robot.

La Maes ha perfino progettato un'architettura basata sulla sussunzione che incorpora «credenze» e «motivazioni». Un robot progettato in base a questi criteri sarebbe in grado di rispondere alla domanda: «Perché Attila ha attraversato la strada?». Il robot potrebbe dire a una persona dove credeva si trovasse un certo oggetto o che cosa l'ha spinto a passare da una stanza all'altra. Più o meno come gli agenti del «comportamento» che guidano la deambulazione o la ricerca, gli agenti delle «credenze» della cosiddetta architettura a rete di agenti della Maes guidano le azioni ad alto livello del robot. Così, l'agente che presiede alla credenza «batteria scarica» potrebbe sopprimere l'esplorazione a favore di un comportamento di «ritorno alla base».

Si può prevedere che i costruttori di sistemi tradizionali, e meno brillanti, saranno nel migliore dei casi indulgenti e nel peggiore dei casi ostili verso Brooks. Richiesto di esprimere il suo parere, Nils J. Nilsson della Stanford University, che dirigeva le ricerche di IA alla SRI International vent'anni fa, ai tempi di Shakey («Traballone»), il primo robot mobile, se la cava citando W. H. Auden: «Chi non ha la ragione / perisce nell'azione. / Chi non agisce / per questo perisce.»

Mitchell è meno diplomatico e afferma che le idee di Brooks e dei suoi colleghi sono «molto seducenti, ma sbagliate». Pur ammettendo che il gruppo di Brooks abbia avuto «un successo sorprendente nella costruzione di sistemi che funzionano bene», Mitchell obietta che l'architettura della sussunzione si presta meglio a costruire termostati che non agenti intelligenti.

Uno dei commenti più positivi, tuttavia, è quello di Newell, la cui architettura SOAR costituisce l'apoteosi del ragionamento elegante e della rappresentazione delle conoscenze. Newell sostiene che il SOAR e la sussunzione non sono poi tanto diversi, perché anche il SOAR in sostanza funziona a stimolo e risposta, a meno che le sue regole non finiscano in un vicolo cieco. A Newell piace l'idea di «reattività» che scorge nei piccoli insettoidi.

Che ad Attila e al suo cuginetto arrida la fama o avvenga di finire in un vicolo cieco filosofico, o capitino entrambe le cose, le ricerche di Brooks sollevano quesiti fondamentali sulla natura dell'intelligenza. Che cosa significa dire che un sistema sa qualcosa? È sufficiente che il sistema si comporti come se sapesse come si fa a non sbattere contro gli ostacoli o deve possedere una rappresentazione esplicita di ingegneria strutturale?

Per i ricercatori è magari più semplice pensare in termini di proposizioni logiche e di inferenza, dice Rosenschein, ma questo non significa che tutto ciò che sta dentro una macchina debba essere rappresentato in termini di logica esplicita, e aggiunge: «Certuni sono impressionati dalla precisione dei linguaggi logici e dalla loro capacità di mettere a confronto i fatti tra di loro», ma nelle macchine reali l'eleganza deve cedere all'efficienza. Stabilire la verità di una proposizione logica è un problema «NP complesso» (non polinomiale complesso) e dunque in linea di principio non può essere risolto in un tempo ragionevole. Quindi per un robot mobile avere una natura computante non è un fatto positivo.

Il problema, secondo Rosenschein, è che i progettisti, inseguendo l'eleganza logica, mescolano fatti statici, sempre veri, con informazioni dinamiche sullo stato corrente del mondo. Per i fatti mutevoli, come l'identità di chi lavora in un certo ufficio o la stazione su cui è sintonizzata la radio, una rappresentazione esplicita può essere utile, ma le costanti, come la presenza della gravità o l'incompenetrabilità dei corpi, non abbisognano di codifica esplicita: basta che il sistema si comporti come se ne fosse al corrente. Rosenschein e collaboratori hanno costruito strumenti di software che incorporano le conoscenze statiche nella struttura di un sistema autonomo.

Ma al progettista di una macchina intelligente spetta anche decidere quali siano le conoscenze che il sistema deve mostrare di possedere e come esse debbano essere rappresentate. Questi problemi sono ben lungi dall'essere risolti. La logica tradizionale, per esempio, riesce a rappresentare i fatti, ma non le intenzioni o le credenze sul mondo o sui risultati di un'azione particolare, dice Stuart C. Shapiro della New York State University a Buffalo, e aggiunge

Tante, troppe conclusioni

«Il barbiere di un piccolo paese in Spagna rade tutti gli uomini che non si radono da soli, e solo quelli. Chi rade il barbiere?» Questo paradosso - che esprime in maniera divertente l'antinomia insiemistica (relativa all'insieme di tutti gli insiemi che non contengono se stessi come elementi) con cui nel 1902 Bertrand Russell infranse il tentativo di Gottlob Frege di ricondurre la teoria degli insiemi di Cantor alla logica - è assurto nell'immaginario collettivo a rappresentare i problemi che possono nascere se si pensa troppo e si perde di vista la realtà.

A ogni buon conto, esso esemplifica bene l'attenzione con cui bisogna procedere quando si vogliono costruire sistemi inferenziali; l'errore di Frege era stato quello di accettare come valido nella sua sistematizzazione della logica un principio apparentemente banale (il principio di comprensione), per il quale ogni proprietà esprimibile nel linguaggio definisce l'insieme (eventualmente vuoto) degli enti che soddisfano tale proprietà. Purtroppo le capacità espressive del suo sistema erano troppo potenti: se gli consentivano di ricondurre la matematica alla logica, ciò avveniva a prezzo della coerenza.

Abituati a fare uso quotidiano delle inferenze logiche nella costruzione dei loro programmi, gli studiosi di intelligenza artificiale prestano molta attenzione a evitare le contraddizioni. E ciò non perché rappresentino un «inestetismo» dei sistemi che costruiscono, ma perché ne distruggono il valore informativo. Nella logica classica, infatti, da una contraddizione è possibile dedurre qualsiasi proposizione.

Supponiamo infatti di avere una contraddizione come «Socrate esiste e Socrate non esiste», che possiamo indicare con *A e non A*. Dalla premessa *A* possiamo legittimamente dedurre *A o B*, dove *B* è un enunciato qualsiasi: se è vero che «Socrate esiste», è *a fortiori* vero, per esempio, che «Socrate esiste o un uomo è un asino». D'altra parte da *A o B* e dall'altra premessa della contraddizione, *non A*, concludiamo in modo formalmente ineccepibile che è vero *B*, cioè che un uomo è un asino, ma anche che quel pericoloso tombino è chiuso ecc.

Per evitare simili inconvenienti, logici e matematici sono soliti imporre diversi tipi di limiti ai formalismi in cui esprimere le teorie. Come ha osservato Stuart C. Shapiro della New York State University a Buffalo, nell'ambito dell'IA può tornare utile invece imporre vincoli di «rilevanza» sulle inferenze: «sapendo che la Luna è e al contempo non è di formaggio, un dimostratore automatico potrà trarre conclusioni su campioni di suolo lunare, ma ciò non consentirà alla macchina di sostenere che il colore del cielo influisce sulle tariffe doganali del grasso di yak».

Ironicamente, osserva altresì Shapiro, la struttura dei dimostratori automatici più semplici garantisce di per sé da una simile «fioritura» di conclusioni: essi non tentano neppure di ragionare spaziando verso oggetti che non siano direttamente collegati a quelli che stanno trattando. I programmi più sofisticati, che con gran fatica dei loro creatori possono collegare fatti distanti, di fronte a una contraddizione generano una esplosiva, dissennata congerie di conclusioni.

che formalismi logici più ricchi comportano il rischio di creare paradossi tali da mettere in ginocchio una macchina ragionatrice (*si veda la finestra a pagina 81*).

Inoltre, dice Shapiro, la logica della credenza e dell'azione non sono le stesse. Nel software basato sulla logica tradizionale, per esempio nel linguaggio di programmazione PROLOG, di solito una credenza è formulata una sola volta, anche se viene usata come passaggio logico in più catene argomentative. Se applicassimo lo stesso criterio di economia alle azioni, potremmo concludere, per esempio, che la mattina non abbiamo bisogno di camminare per uscire dal portone perché abbiamo già camminato per andare in bagno a lavarci i denti.

Per gli agenti intelligenti le rappresentazioni logiche in grado di affrontare tanto le azioni quanto le credenze sono essenziali. Non solo a queste macchine si richiederà di ragionare sulle conseguenze delle loro azioni, osserva Shapiro, ma anche di rappresentare e comprendere credenze e azioni di altri agenti intelligenti. Per esempio: «Tizio crede che Caio crede che il programma sia difettoso, mentre Tizio ritiene che sia corretto, e tuttavia ha ragione Caio.»

Queste regressioni logiche sono riflesse nelle ricerche di Thomas Dean, della Brown University, i cui sistemi non solo pianificano le proprie azioni, ma anche quanta pianificazione fare. Chi progetta questi «algoritmi di occasione» ha la sgradevole consapevolezza che le risorse di calcolo non sono infinite: come le persone, anche le macchine possono esercitare solo quella che Herbert A. Simon chiama «razionalità limitata».

Allen Newell, della Carnegie Mellon University (*a sinistra*), e John E. Laird, dell'Università del Michigan, sono i principali artefici del SOAR, un sistema integrato ragionatore che ha quasi dieci anni di vita. Alcune varianti di questo sistema possono controllare robot mobili, comprendere l'inglese corrente ed eseguire svariati altri compiti più o meno concreti.

Spezzoni di conoscenza

Per macchine che debbano funzionare in «tempo reale» le tecniche di ragionamento che forniscono risposte esatte prima o poi si rivelano insufficienti. (Anche la definizione precisa di tempo reale è controversa, ma Mitchell propone la comoda regola empirica che il tempo impiegato per riflettere non debba di massima superare la durata dell'azione su cui si riflette.) Di fatto, anche tecniche di ragionamento che producano rapidamente risposte approssimate possono non essere adeguate se non vi è la possibilità di interromperle in qualunque momento. Come sa chi abbia visto un oggetto fragile e prezioso sul punto di cadere a terra, in pratica qualunque tipo di azione è meglio dell'inazione.

I sostenitori di questa metapianificazione sono inclini a usare algoritmi basati sul «raffinamento iterativo»: applicati una volta, forniscono una risposta, applicati un'altra volta forniscono una risposta migliore e così via. Possedendo informazioni relative al modo in cui le risposte migliorano col tempo e al costo del ritardo, il sistema può decidere quanto tempo debba riflettere prima di agire. Dean ammette tuttavia che sussiste ancora un livello di regressione: anche l'ottimizzazione del tempo da dedicare alla pianificazione è, infatti, un problema insolubile, quindi il metapianificatore deve o fare approssimazioni oppure pianificare quanto tempo dedicare a pianificare il tempo da dedicare a pianificare e così via all'infinito.

Dean ha dato una dimostrazione matematica del fatto che la regressione logica prima o poi «tocca il fondo», ma ammette che le macchine intelligenti basate sui suoi algoritmi sono ancora in fase di formazione, «nella fase appunto in cui sono abbastanza robuste da camminare per il corridoio senza sfregiare l'intonaco». Dean prevede che bisognerà forse aspettare la fine del secolo perché gran parte dei sistemi reattivi e pianificanti cessino di usare quelli che in pratica equivalgono a metodi *ad hoc* per distribuire le risorse di calcolo.

Uno di questi schemi logici relativamente semplici è quello del SOAR, che in varie forme funziona da nove anni presso il gruppo di Newell; esso si basa sulle tecniche di ricerca e «spezzatura».

Quando s'imbatte in un problema, il sistema controlla se qualcuna delle regole che si trovano nella sua base di conoscenze è applicabile ed emette una raffica di deduzioni finché non può più continuare. Se il problema è risolto, bene. Altrimenti per uscire dal vicolo cieco il SOAR (sigla che un tempo significava State, Operator And Result) allestisce uno «spazio del problema» all'interno del quale cerca tutte le soluzioni possibili usando, se ce ne sono, tecniche specifiche, e altrimenti la forza bruta. Quando ha scoperto una soluzione, il SOAR generalizza la tecnica utilizzata per arrivarci e la compila facendone uno «spezzone», una regola che sarà attivata quando in futuro si presenterà un quesito analogo, eliminando così la fatica della ricerca.

Il modulo del SOAR per la comprensione del linguaggio naturale (NL-SOAR), dice Newell, è un esempio di questa tecnica. Esso applica semplicemente l'operatore «Capire questa parola nel contesto» a ciascuna nuova parola immessa, snocciolando deduzioni e formando un gran numero di spezzoni. Secondo John E. Laird dell'Università del Michigan, che nel corso degli anni ha perfezionato il SOAR con Newell e altri, il SOAR del linguaggio naturale parte avendo nella propria base di conoscenze circa 900 regole, e dopo aver compreso solo poche centinaia di parole giunge a possederne più di 1500. Newell sostiene che, in linea di principio, il sistema è in grado di apprendere un numero indefinito di parole e di regole nuove e parla di far funzionare il SOAR per un mese intero «aggiungendovi di continuo conoscenze in maniere interessanti».

Poi fa marcia indietro e dice che, allo stato attuale degli esperimenti, «non è detto che il sistema non si blocchi dopo un paio di ore». Il difetto sta nelle regole iniziali, inserite nel sistema dagli uomini con una codifica «a mano»: la struttura di questi spezzoni favorisce in qualche modo un cattivo apprendimento. È strano, commenta Newell: meno regole vi inseriscono gli uomini, e più il SOAR ne deve quindi imparare da sé, meglio funziona.

Oltre al sistema per il linguaggio naturale, il SOAR gestisce anche un paio di applicazioni di robotica: il Robo-SOAR, un braccio robotico, e l'Hero-SOAR, un robot mobile. Il RoboSOAR, che sfrutta un modulo di visione separato per individuare la posizione degli oggetti piccoli nel suo spazio di lavoro, può eseguire compiti semplici, come sollevare e sovrapporre cubetti. L'Hero-SOAR esplora il proprio ambiente con sensori ultrasonici, dedicando un'attenzione particolare alle cose che somigliano ai bidoni della spazzatura.

In prospettiva, dice Laird, i vari moduli del SOAR saranno unificati, e ciò consentirà a un robot di accettare ordini, e di rispondere in inglese ordinario pur continuando a eseguire il suo lavoro. Ma i ricercatori dovranno prima risolvere alcuni problemi relativi al sistema per la visione e ad altri moduli.

Il software per la visione analizza le scene dando loro una forma che non sempre è adatta alle informazioni di cui avrebbe bisogno il risolutore di problemi del SOAR. Inoltre la telecamera è montata proprio sopra lo spazio di lavoro del robot e quindi RoboSOAR non può vedere ciò che sta facendo. Il sistema deve analizzare la scena, avvicinare la pinza e tentare di raccogliere gli oggetti, poi togliere di mezzo la pinza per vedere se la cosa gli è riuscita. È un po' come un uomo che indossi pesanti guantoni e che cerchi di giocare a scacchi dando un'occhiata alla posizione, decidendo la mossa da fare e poi, con gli occhi chiusi, allunghi la mano per spostare il pezzo.

Il sistema THEO di Mitchell usa una architettura «pianifica e compila» concettualmente simile a quella del SOAR. Secondo Mitchell l'integrazione non è affatto sufficiente: l'organizzazione è essenziale. Senza un metodo per concentrarsi sui fatti pertinenti al caso da affrontare, un programma s'impantana. «Capimmo subito che se un sistema ha cinque regole funziona bene, se invece ne ha 5000 s'impantana senza scampo.» (Newell riferisce di un'esperienza identica con il SOAR: aggiungendo un solo «spezzone costoso» alla base di conoscenze si rischia di innescare come reazione una catena logica che rallenta il programma di un fattore quattro.)

Oltre che intasare la memoria, gran parte di ciò che un sistema apprende tramite gli esempi, anche se è vero, può essere irrilevante o addirittura fuorviante. Mitchell paragona il problema a una versione automatizzata dei *cargo cult* dei polinesiani, che costruivano piste di atterraggio e aerei di legno per attirare dal cielo i beni e la tecnologia occidentali.

La spezzatura può accelerare l'esecuzione dei piani, ma non li rende per nulla più corretti. Se il piano è basato su una visione sbagliata del mondo, a volte fallisce. Un sistema intelligente ideale apprenderebbe dai propri errori, ma fargli imparare le cose giuste è un problema. «Non esiste un modello perfetto delle conseguenze di certe azioni», dice Mitchell, quindi la tattica migliore è forse quella di lasciare che THEO ogni tanto sbagli e tenti di correggere i propri errori, piuttosto che cercare di prevedere tutto ciò che potrebbe andare storto.

L'IA incontra la realtà virtuale

Una condizione che Mitchell sottolinea quando parla di lasciare che THEO e altri agenti intelligenti «sperimentino» il mondo che li circonda è che il robot o le cose su cui esso agisce non patiscano alcun danno. Perciò numerosi ricercatori hanno approntato simulazioni al calcolatore per esercitare i programmi che fungeranno da cervello delle loro macchine autonome. Tra gli abitanti di mondi virtuali più riusciti vi è Homer. Progettato da Steven A. Vere dell'Artificial Intelligence Center della Lockheed, a Palo Alto, in California, Homer è un sommergibile virtuale che vive in un mondo acquatico contenente navi, pesci, balene, altri sommergibili, mine, boe, uccelli, isole, bacini e persone.

Homer capisce circa 800 parole e può svolgere lavori a più stadi, come: «Porta la boa rossa al bacino prima di mezzogiorno e poi incontrati con Roger al frangiflutti.» Quando non sa dove si trovi qualcosa Homer sa chiedere informazioni alle persone e segue di continuo ciò che avviene nel suo ambiente.

La stampata di una sessione con Homer somiglia molto alla trascrizione di una giornata trascorsa con un bambino di tre anni molto precoce:

«Vedo un uccello marrone sul tronco grigio.»

«Ci sono due barche a vela vicino all'isola.»

«La *Smirnov* mi ha appena superato di nuovo a destra.»

«Ho appena raggiunto il bacino di carenaggio.»

«Homer, portami la boa di Fred.»

«Adesso vado da Fred.»

«Fred, dov'è la tua boa?»

Vere ammette che lavorare in un mondo simulato semplifica di molto il suo compito, ma sostiene che gran parte delle capacità di Homer potrebbero essere trasferite a un minisommergibile reale. In particolare, il sistema che conferisce a Homer una visione simulata particolarmente acuta non è molto raffinato. Dato che l'ambiente marino contiene pochi oggetti diversi, un sistema percettivo piuttosto semplice sarebbe in grado di distinguere tra pesce, balena, nave, barca a vela, tronco, uccello e terra. La competenza di Homer sarebbe ancora maggiore se fosse trapiantato in un ambiente artificiale simile sotto il profilo concettuale (anche se diverso sotto quello geografico), per esempio una stazione spaziale, dove ogni oggetto fosse identificato da un contrassegno univoco.

A prima vista Homer rappresenta un successo per le architetture integrate intelligenti: può pianificare le proprie azioni, modificare i piani se le circostanze mutano e interagire con gli altri. Sotto queste apparenze, dice Vere, la realtà non è però così rosea. Homer è lento e la sua memoria è inefficiente. Più vive più diventa lento. Bastano pochi scenari messi insieme per portare il programma sull'orlo dell'arresto. «È come un castello di carte; - si rammarica Vere - quando gli si aggiunge una nuova capacità, si scopre che i vecchi scenari non funzionano più. Bisogna far marcia indietro e riaccordare il tutto.»

La vita di Homer è minacciata anche dalle lamentazioni dell'amministrazione e dalla graduale estinzione del suo gruppo di ricerca. Un collega di Vere, Timothy W. Bickmore, lasciò la Lockheed un anno fa e ora la società consente a Vere di dedicare al progetto solo la metà del suo tempo. Benché il nuovo hardware informatico abbia consentito di migliorare il tempo di reazione di Homer,

portandolo da valori miserevoli a valori tollerabili (per pianificare un'azione semplice prima ci volevano parecchi minuti, ora bastano trenta secondi), il sogno di trapiantarlo in un vero minisommergibile è di là da venire.

Poco lontano da Vere, all'Ames Research Center della NASA, un altro agente simulato presenta maggior concretezza. L'Entropy Reduction Engine (ERE) di Mark E. Drummond è un modello concettuale dei robot che in un prossimo futuro potrebbero aiutarci nella manutenzione di strutture in orbita o sulla Luna.

Per il momento l'ERE vive nel Tile World, una Flatlandia a griglia contenente un numero arbitrario di piastrelle poligonali. Questo mondo è infestato da venti che possono spostare le piastrelle e i tentativi del robot di spostarle o di afferrarle con le sue quattro pinze possono fallire. È un ambiente semplice, che tuttavia, secondo Drummond, presenta una varietà più che sufficiente per elaborare i temi più importanti della pianificazione e del controllo.

ERE consiste di componenti che suddividono i problemi in forme più semplici, valutano le soluzioni possibili e compilano regole per mandarle a effetto. È progettato non solo per gli «obiettivi di esecuzione», per esempio disporre le piastrelle secondo una configurazione particolare, ma anche per quelli che Drummond chiama vincoli di comportamento: per esempio garantire che una certa configurazione di piastrelle resti intatta nonostante l'azione dei venti. (A Drummond piacerebbe poter prima o poi generalizzare questo comportamento e costruire un robot al quale poter dire: «Mantieni la stazione spaziale in assetto di funzionamento. Questo è l'elenco dei guasti possibili e qui ci sono attrezzi e pezzi di ricambio.»)

L'interesse di Drummond per il Tile World supera tuttavia i confini delle sue ricerche: egli spera che il suo semplice ambiente simulato venga accettato come un quadro di riferimento entro il quale i progettisti dei diversi sistemi intelligenti possano confrontarne le prestazioni in vari compiti normalizzati, individuando punti di forza e debolezze delle varie architetture. L'Ames Research Center della NASA ha vinto, insieme con la Teleos di Rosenschein, un contratto di ricerca della Defense Advanced Research Projects Agency per individuare un gruppo di parametri per i sistemi intelligenti integrati.

A un estremo della gamma dell'intelligenza e dell'azione zampettano i robot insettoidi di Brooks; al centro stanno decine di sistemi, come quelli costruiti da Vere e Drummond, che posseggono diversi livelli di conoscenza e capacità; all'altro estremo si staglia maestoso il Cyc di Douglas B. Lenat, che sa quasi tutto (all'ultima conta conteneva 1,43 milioni di fatti interconnessi), ma non fa quasi niente. In effetti molti obietterebbero all'inserimento di Cyc nella categoria dei sistemi intelligenti integrati, perché in sostanza si tratta di un'enciclopedia automatizzata (da cui il nome).

Alla possibilità di considerare Cyc come un essere (benché, come SOAR, stia per compiere dieci anni), si oppone il fatto che esso non ha alcun vero senso di sé. Questo è il parere di Patrick Hayes, di Stanford, presidente della American Association for Artificial Intelligence. Hayes, già direttore della sede di Cyc nella West Coast, decise di diventarne un semplice consulente a causa di divergenze concettuali con Lenat. «Cyc sa che esiste una cosa che si chiama Cyc e sa che Cyc è un programma, - dice Hayes - ma non ha idea che Cyc *è* lui stesso.»

Nonostante ciò, si tratta di un programma notevole. Il consorzio MCC per cui lavora Lenat, costituito da 56 società informatiche di altissimo livello, ha investito in Cyc 1000 anni-programmatore. Ci vorrà probabilmente altrettanto lavoro affinché Cyc (tra il 1994 e il 1995, secondo le speranze di Lenat) raggiunga il punto di svolta corrispondente a 10 milioni di fatti. A quel punto gli sarà più facile incamerare le nuove conoscenze leggendo che non facendosi «imboccare» dagli ingegneri. Una più vasta base di informazioni potrebbe anche evitare a Cyc granchi clamorosi, come quando ha concluso, esaminando gli esseri umani che conosceva, che tutti gli uomini al mondo sono amici di Lenat.

Un mondo marino simulato è il regno di Homer, un agente intelligente costruito da Steven Vere dell'Artificial Intelligence Center della Lockheed. Homer comprende semplici ordini in inglese, riesce a formulare piani e poi a eseguirli.

Non esiste una via facile

Il programma è fatto in modo da possedere il tipo di conoscenze di cui può aver bisogno un agente intelligente per eseguire i propri compiti: che cosa sono e come interagiscono le persone, gli alberi e gli autobus, come cadono e si rompono gli oggetti o come funziona una lampada. Lenat prevede che un giorno Cyc soddisferà le richieste di conoscenze nell'ambito del buon senso rivoltegli dai programmi per la comprensione del linguaggio naturale e dai sistemi esperti che vogliano manifestare un comportamento sensato in prossimità dei margini della loro competenza. Cyc potrebbe anche aiutare le persone a decidere che modello di automobile acquistare. Quasi tutto, osserva Lenat, potrebbe essere pertinente, dall'evoluzione dei ruoli legati al sesso all'interno della famiglia alla frequenza relativa delle contravvenzioni contestate alle auto rosse.

Nonostante le sue dimensioni Cyc è molto artigianale. Tutto ciò che sa lo asserisce in due forme diverse: prima in un «linguaggio epistemologico» chiaro ed elegante e poi a livello euristico mediante un «sacco di rappresentazioni diverse» concepite per rendere più rapida l'inferenza per una categoria particolare di fatti. Per ora il sistema contiene 27 motori inferenziali distinti e Lenat intende aggiungerne via via altri.

Quindi, sostiene Lenat, Cyc evita il conflitto tra capacità espressive ed efficienza. Impiegando «un armamentario di soluzioni parziali» Cyc affronta il tempo, lo spazio, la causalità, le credenze e l'intenzione, risolvendo problemi che mettono in crisi altre intelligenze artificiali. «Gran parte della potenza, positiva o negativa, delle architetture intelligenti integrate - dice Lenat - scaturirà dal contenuto, e non dall'architettura.»

Inoltre per Lenat è illusorio ritenere che una sola struttura particolare di algoritmi possa rendere possibile il comportamento intelligente. «L'intelligenza - dice - è fatta di dieci milioni di regole. Se si possiede una rappresentazione delle conoscenze buona a metà e un'architettura buona a un quarto, non si ha nessun problema.» Secondo Lenat, i ricercatori che pensano che un'unica elegante teoria possa risolvere tutti i problemi della rappresentazione delle conoscenze e dell'inferenza soffrono di «invidia per la fisica». «Vogliono una teoria concisa, potente e corretta, perciò tentano una dopo l'altra le tattiche più economiche.»

Douglas B. Lenat, dell'MCC, è l'ispiratore di Cyc, un progetto decennale per «codificare il buon senso». Quando nacque, sette anni fa, Cyc era considerato quasi una follia da molti ricercatori, mentre oggi appartiene alla corrente ortodossa.

Tutte le discussioni filosofiche e tutto il talento ingegneristico messi in opera possono sembrare eccessivi per raccogliere tazzine di polistirolo dal pavimento del laboratorio, sempreché non siano incollate al suolo. Quando, e come, la vita dei sistemi intelligenti integrati supererà la barriera delle 24 ore?

Si è tentati a volte di credere che gli enormi progressi nei semiconduttori consentiranno di risolvere i problemi della percezione e del ragionamento con la forza bruta. In fin dei conti, come dice Newell: «Se non fosse che la potenza delle stazioni di lavoro è raddoppiata ogni anno, saremmo già morti.» Grazie a chip più veloci ed economici, robot mobili e dotati di telecamera sono già alla portata di molti gruppi di ricerca.

In realtà, tuttavia, Newell ammette che i progressi nei circuiti integrati hanno al massimo consentito ai grandi progetti come il SOAR di mantenere un certo vantaggio sui piccoli costruttori. Né si rallegra pensando alle prestazioni di sistemi contenenti magari 200 000 regole invece delle poche migliaia che le sue modeste macchine posseggono oggi. Mitchell è d'accordo: «Ci piacerebbe credere che la nostra salvezza verrà dal silicio, ma questo non è vero.»

Può darsi invece che la soluzione venga semplicemente col tempo e col lavoro. Per loro natura i sistemi intelligenti integrati sono dei tuttofare e non sono all'avanguardia in alcun settore specifico dell'intelligenza artificiale. E ora che la pianificazione, la comprensione del linguaggio naturale e altre discipline hanno raggiunto la maturità, continua Newell, «per arrivare alla frontiera bisognerà percorrere ancora una lunga strada». Ma se i ricercatori di intelligenza artificiale riusciranno a perseverare, prolungando i loro sforzi ben al di là dei risultati ottenuti dai singoli e con le singole sovvenzioni di ricerca, le loro creature di silicio potranno forse crescere e dimorare infine in corpi funzionanti.

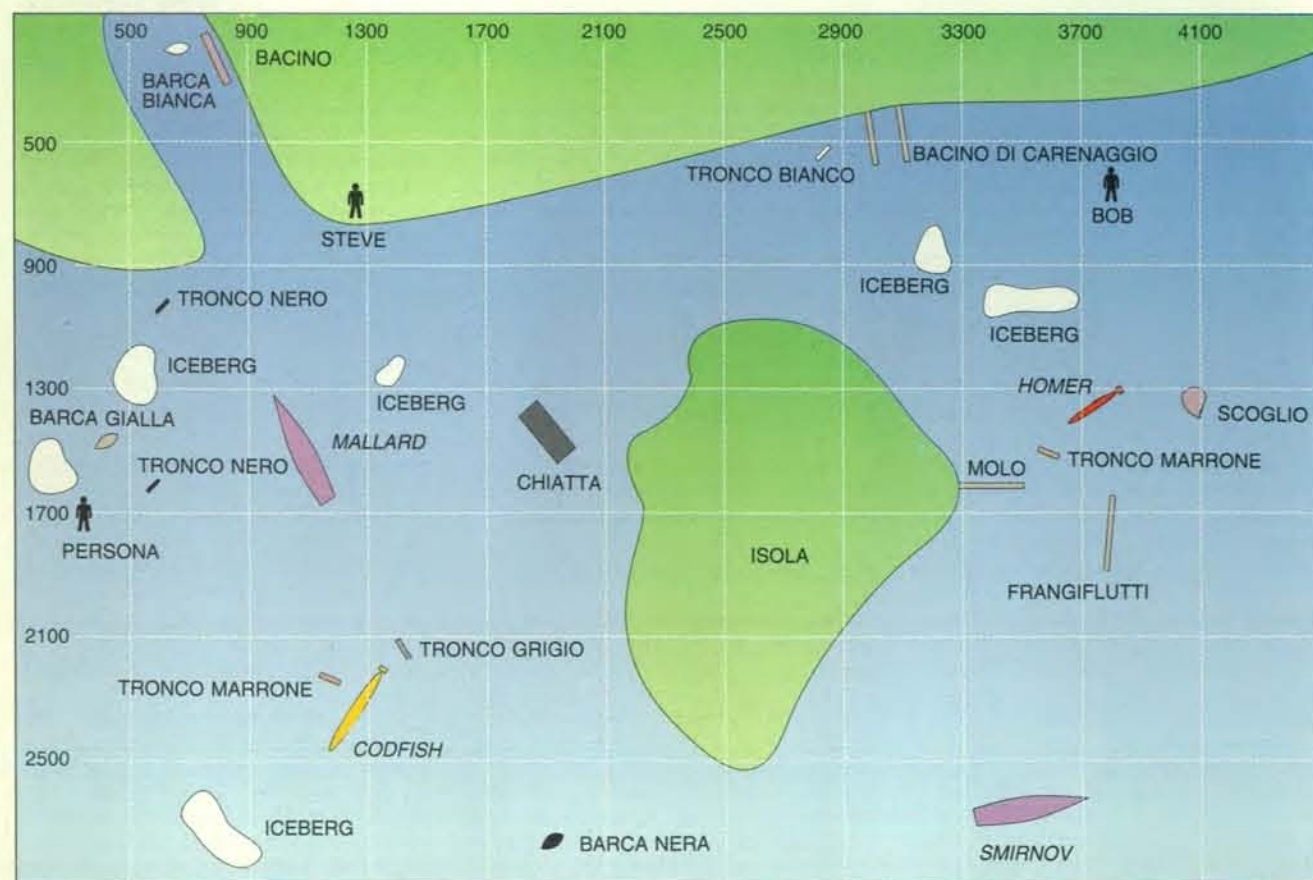
BIBLIOGRAFIA

BALLARD DANA H., *Reference Frames for Animate Vision* in *Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence: Proceedings*, Morgan Kauffmann Publishers, 1989.

MAES PATTIE (a cura), *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*, MIT/Elsevier, 1990.

NEWELL ALLEN, *Unified Theories of Cognition*, Harvard University Press, 1990.

BROOKS RODNEY A., *Intelligence without Reason* in *Twelfth International Joint Conference on Artificial Intelligence: Proceedings*, Morgan Kauffmann Publishers, 1991.

Special Section on Integrated Cognitive Architecture (Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Integrated Intelligent Architectures) in «ACM SIGART Bulletin», 2, n. 4, agosto 1991.

L'ANGOLO MATEMATICO

di Ian Stewart

Rapido viaggio verso l'infinito

Diario del capitano, data astrale 2529.2: «La missione quinquennale della nave stellare *Overambitious* è quella di invadere nuovi mondi ignoti, di portare rovina e distruzione in nuove civiltà e di andare coraggiosamente là dove la Flotta astrale ci invia. Di solito, però, abbiamo a che fare con stolidi abitatori dello spazio che credono di poter distruggere un'astronave. Proprio ieri un baco cosmico ci ha avvolti in un gigantesco bozzolo. La creatura non poteva certo tener testa al nostro telaio materia-antimateria e, infatti, ne abbiamo ricavato seta sufficiente per tutto l'equipaggio. Ora ci siamo messi in rotta per...»

Allarme rosso! Allarme rosso!

Il capitano Jonah T. Kink ebbe un sussulto e poco mancò che cadesse dalla poltrona di comando.

«Che cosa succede, signor Pock?»

Il primo ufficiale Pock balzò al quadro di comando. «Capitano, sembra che siamo incappati in una regione luminescente dello spazio!» disse sollevando un sopracciglio. «Sono sicuro al 99,357 per cento che ci troviamo in un Campo Newtoniano Ideale.»

«Che accidenti è un Campo Newtoniano Ideale?» esclamò il dottor Annoy dall'altro capo della sala di comando.

«Zitto, Annoy, altrimenti la mando indietro a suturare il baco cosmico!» latrò Kink. «Vada avanti, signor Pock.»

Pock era nato e cresciuto sul pianeta Vulgaria. Sua madre era una vulgariana e suo padre un warthog. Quindi Pock era per metà vulgariano; secondo qualcuno, anche di più. «Capitano, l'allarme rosso è scattato appena ci siamo avvicinati a un pianeta abitato da alieni straordinariamente intelligenti, conosciuti con il nome di Weelers. La loro tecnologia è così avanzata che possono creare universi molto differenti dal nostro, e sembra che ci abbiano intrappolato proprio in uno di questi, governato dalle leggi della fisica newtoniana. L'*Overambitious* sta ora viaggiando attraverso un universo infinito tridimensionale in cui spazio e tempo sono assoluti.»

«Intende dire che non c'è relatività? Einstein ne sarebbe agghiacciato.»

«Deduzione logica, capitano, ma le conseguenze sono molto più allarmanti. In un Campo Newtoniano Ideale, un corpo dotato di massa può anche essere niente più che un punto nello spazio, e... mi scusi, capitano, i sensori rilevano un proiettile diretto su di noi.»

«Lo inquadri sullo schermo, signor Pock! Manovra di evasione, Flakeoff!»

Il proiettile stava guadagnando velocità in modo vertiginoso.

Whoosh!

Kink e il suo equipaggio furono sballottati come pendolari sulla metropolitana. «Tenente Yahoota, ha rilevato la traiettoria del proiettile?»

«Il proiettile puntava in direzione 12 punto 53 punto 30, ma poi ha improvvisamente abbandonato l'universo.»

«Vuole dire che è svanito?»

«Non esattamente, signore. Ha raggiunto l'infinito. Ci è arrivato esattamente 17,23 secondi dopo che lo abbiamo individuato.»

«Sorprendente» dichiarò Pock. «Un fenomeno completamente ignoto agli umani e ai vulgariani.»

«Il proiettile era formato da una grande quantità di masse puntiformi» aggiunse Yahoota.

«Signor Dott, qual è la sua analisi?» L'ingegnere capo, uno scozzese, consultò i suoi strumenti. «Masse puntiformi newtoniane, direi. Particelle piccolissime, signore. Newtroni o Newtrini, non saprei dire con certezza.»

«Tracce di forze inconsuete?»

«No, signore. Solo la solita legge gravitazionale dell'inverso del quadrato.»

Il signor Pock battè qualche tasto al calcolatore. «Capitano, il proiettile è arrivato all'infinito in un periodo di tempo finito, senza l'aiuto di alcuna tecnologia, a parte il Campo Newtoniano Ideale.»

«Ma... è impossibile!» esclamò Kink. «Un sistema di masse puntiformi in un campo gravitazionale non può schizzar via all'infinito: violerebbe la legge della conservazione dell'energia.»

«Non è così semplice, capitano» spiegò Pock. «Un aumento di energia cinetica potrebbe essere compensato da una perdita di energia potenziale. Le masse possono andare sempre più veloci se viaggiano in un campo gravitazionale sempre più debole, e una situazione di questo genere può prodursi nel caso le masse continuino ad allontanarsi sempre più l'una dall'altra. Yahoota, le masse hanno puntato verso l'infinito tutte nella stessa direzione?»

«No, signor Pock. Le masse sono esplose in tutte le direzioni.»

Kink insistette: «D'accordo, ma le masse non possono comunque arrivare all'infinito: è contro ogni logica.»

Le orecchie di Pock si rizzarono al suono di una delle sue parole favorite: «Da un punto di vista logico, capitano, lei ha ragione. In un certo senso, però, si può dimostrare che una particella raggiungerà l'infinito se oltrepassa una sfera di raggio qualsiasi prefissato dopo un adeguato periodo di tempo. Pensi a una singola particella che viaggi in linea retta a velocità costante. Dopo un tempo infinito, sarà uscita da qualsiasi sfera finita, valicando effettivamente il confine dell'universo. Ma naturalmente non si può oltrepassare il confine di un universo infinito.»

«Ovviamente, signor Pock, intendevo dire che le masse non possono raggiungere l'infinito in un tempo finito.»

Pock rifletté intensamente agitando le orecchie. «Forse ha ragione, capitano. Ci sarebbe, però, un meccanismo...»

Il signor Dott sbuffò rumorosamente. «Le saremmo grati se volesse illuminarci, signor Pock.»

«Se una particella accelera con sufficiente rapidità, può percorrere una distanza infinita in un tempo finito. Immaginiamo che per il primo secondo la particella si muova alla velocità di un metro al secondo: in un secondo percorre un metro. Ora facciamola accelerare in modo che per il mezzo secondo successivo si muova a due metri al secondo, percorrendo un altro metro. Continuiamo poi allo stesso modo, dimezzando l'intervallo di tempo e raddoppiando la velocità. Vi faccio vedere.» Con il suo stilo d'ordinanza, Pock compilò una tabella:

	Velocità (m/s)	Distanza (m)	Distanza totale
Primo secondo	1	1	1
1/2 s successivo	2	1	2
1/4 s successivo	4	1	3
1/8 s successivo	8	1	4
1/16 s successivo	16	1	5
1/32 s successivo	32	1	6

«Dopo due secondi, la particella avrà percorso una distanza infinita - sempre che la velocità vada aumentando a un ritmo maggiore di quello con cui diminuiscono gli intervalli di tempo. In altri termini, una particella qualsiasi può raggiungere l'infinito se la sua velocità aumenta in modo geometrico in intervalli temporali che diminuiscono in modo geometrico. È quello che personalmente chiamo il Principio di Pock della crescita geometrica. Il tempo necessario per raggiungere l'infinito dipende dal ritmo di crescita, ma sarà sempre finito.»

«Ma, signor Pock» intervenne Dott con voce suadente, «questo significa che quel piccolo demonio dovrebbe essere in grado di viaggiare a una velocità superiore a quella della luce.»

«Sì» disse Pock, «ma non ho bisogno di ricordarle che in un Campo Newtoniano Ideale un oggetto può superare la velocità della luce.»

Kink tamburellava con le dita sulla poltrona. «Dotty, abbiamo la possibilità di difendere la nave dai punti massa?»

«Le bombe ai newtroni farebbero al caso nostro signore. Ne abbiamo una scorta molto limitata, però. Una domanda, Yahoota: quanti di quei mostriciattoli puntiformi ci sono passati vicini?»

«Non lo so con certezza, signore. Non moltissimi, comunque. Tutto è avvenuto così in fretta che gli strumenti non hanno potuto contarli con precisione.»

«Non poteva essere un solo corpo» borbottò il vulgariano. «In presenza di gravità newtoniana, un corpo che non subisca l'influenza di altre forze si muove a velocità costante in linea retta.»

«Forse erano due corpi» asserì Kink.

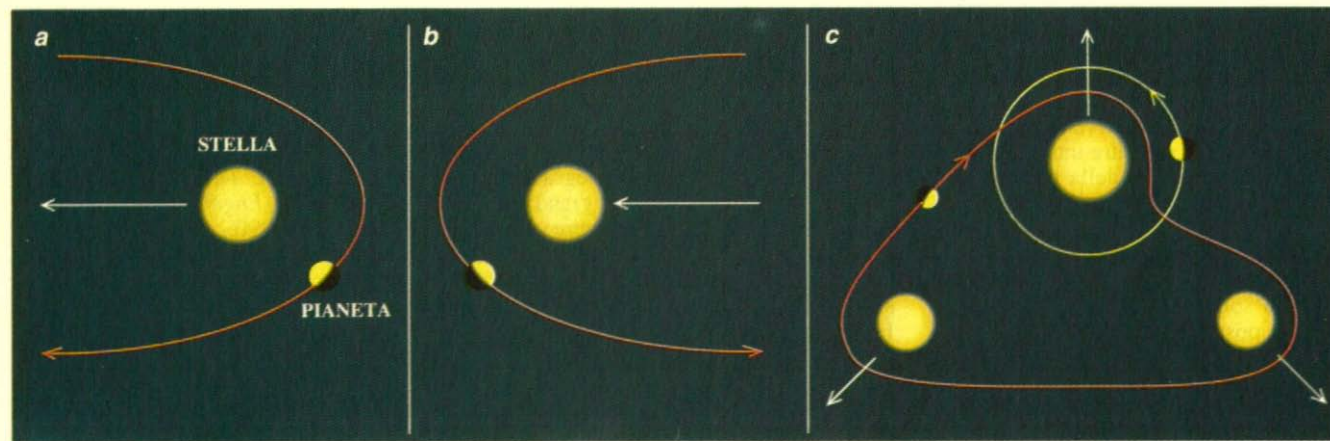
«No, capitano» disse Pock. «Con due corpi, le orbite possono essere ellittiche, iperboliche o paraboliche. I pianeti si muovono lungo orbite ellittiche; le comete vengono dalle profondità dello spazio percorrendo orbite paraboliche o iperboliche. I pianeti, nelle loro orbite ellittiche, non possono certo raggiungere l'infinito: rimangono vincolati ai loro soli. Le comete possono raggiungere l'infinito, ma impiegando un tempo infinito, in quanto rallentano via via che si allontanano.»

«E allora quanti erano questi corpi?»

«Capitano, possiamo essere certi» affermò Pock «che gli Weelers utilizzerebbero il minor numero possibile di masse. La loro straordinaria efficienza è addirittura leggendaria. Chiederò informazioni al calcolatore di bordo.» Pock girò qualche manopola. «Interessante. Pare che il problema sia stato posto per la prima volta in data astrale 1895 dal matematico Paul Painlevé...»

«Non è il caso che ce lo legga, Pock. Metta in funzione il sintetizzatore di voce del calcolatore.»

Il calcolatore parlò con una voce che sembrava quella di Daffy Duck attraverso un barattolo di latta. «Painlevé studiava le singolarità: situazioni in cui le leggi della fisica newtoniana perdono validità. Più precisamente, un sistema può avere una singolarità in un certo istante di tempo se le soluzioni delle sue equazioni dinamiche non ammettono un prolungamento all'istante successivo. La singolarità più semplice per un sistema di masse puntiformi in un campo gravitazionale si ha quando due masse collidono e vanno a occupare lo stesso punto nello spazio. Oltre che nel caso di una collisione, singolarità si producono quando una massa raggiunge l'infinito in un tempo finito. Queste situazioni sono note come ipersingolarità.»

«Come ho già spiegato» aggiunse Pock, «uno o due corpi non possono in

L'effetto fionda fa accelerare un pianeta quando questo tende ad avvicinarsi a una stella in direzione opposta al moto della stella stessa (**a**). *Quando un pianeta si avvicina provenendo dalla medesima direzione di moto della stella* (**b**) *rallenta, mentre la stella accelera. A causa dell'effetto fionda, i corpi celesti della configurazione a destra* (**c**) *accelerano in differenti direzioni. Il sistema si espanderà all'infinito in un universo nel quale non abbiano alcun ruolo le leggi della relatività.*

Un numero qualsivoglia di pianeti e di stelle può sfuggire all'infinito nel caso le orbite seguano configurazioni simili a quella rappresentata qui sopra. La configurazione si basa su un poligono regolare, in questo caso un ottagono. Per ciascun lato del poligono ci sono due stelle e un pianeta. Coppie di stelle orbitano intorno a ciascuno dei vertici del poligono mentre i pianeti passano da una coppia all'altra.

alcun modo produrre ipersingolarità.»

«Il signor Pock è così geniale che se potessi lo bacerei!» tubò il calcolatore.

«Calcolatore!» sbraitò Kink, «Smetti di flirtare con il signor Pock e lavora!»

«Painlevé dimostrò che tre corpi non possono generare una ipersingolarità, ma non riuscì a estendere questo risultato a quattro o più corpi. Egli riconobbe due tipi di ipersingolarità: una si produce quando un corpo viaggia verso l'infinito lungo una traiettoria semplice; l'altra prevede un corpo che inizia a oscillare in modo sempre più ampio con l'approssimarsi del tempo a un certo particolare valore. Nel ventesimo secolo, Hugo von Zeipel dell'Università di Uppsala, Richard P. McGehee dell'Università del Minnesota, Donald G. Saari della Northwestern University e Hans Sperling, allora presso la Boeing di Huntsville, in Alabama, dimostrarono che qualsiasi sistema generi uno dei due tipi di ipersingolarità deve produrre anche l'altro tipo. In altri termini, devono esistere corpi che viaggiano verso l'infinito subendo ampie oscillazioni.»

«Dimmi qualcos'altro su questi ipercosi» chiese Kink.

«Saari dimostrò che quattro corpi possono produrre una ipersingolarità. Ma se la velocità, la posizione e la massa di questi corpi sono scelte a caso, la probabilità che si produca una ipersingolarità è pressoché nulla. John N. Mather della Princeton University e McGehee scoprirono effettivamente una ipersingolarità in un sistema di quattro corpi confinato in una sola dimensione, ma solo dopo un numero infinito di collisioni interpretate come urti elastici. Poi, in data astrale 1984, Joseph L. Gerver della Rutgers University ideò uno scenario che consente a cinque corpi di raggiungere l'infinito. Ora ve lo mostrerò.»

Il calcolatore proiettò immagini sullo schermo principale. Si vedevano tre stelle, una più grande delle altre, disposte a triangolo con un angolo ottuso avente il vertice in corrispondenza della più grande. «Ricordate che le masse di questi corpi sono confinate in un punto. La loro dimensione sullo schermo rappresenta solo la loro massa relativa.»

Apparve un asteroide in un'orbita esterna e molto vicina a tutte e tre le stelle. Ogni volta che l'asteroide superava la stella di massa maggiore, guadagnava velocità per il fenomeno noto con il nome di effetto fionda. L'asteroide acquistava energia gravitazionale dalla stella, mentre l'energia della stella diminuiva in proporzione. Nei successivi incontri con le altre due stelle, l'asteroide trasferiva loro energia secondo un effetto fionda inverso. Il risultato era un incremento nella velocità dell'asteroide e in quella delle due stelle di massa minore.

«In questo sistema, la legge della conservazione dell'energia impedisce che anche la stella di massa maggiore acquisti velocità. Ne consegue che nessuno degli oggetti raggiunge l'infinito in un periodo di tempo finito. Ma Gerver trovò una scappatoia legale.»

Il calcolatore visualizzò un quinto corpo, un pianeta in orbita intorno alla stella di massa maggiore. Ora, al passaggio dell'asteroide al di là del pianeta e della stella, il pianeta iniziò a perdere energia in quantità tale che la stella più grande iniziò ad acquistarne un poco. A ogni passaggio dell'asteroide, le stelle e l'asteroide acceleravano, mentre il pianeta rallentava avvicinandosi a spirale alla stella. Le energie si bilanciavano e il triangolo iniziò a espandersi con crescita geometrica. In un tempo finito tutte e tre le stelle fuggirono all'infinito portando con sé asteroide e pianeta!

Il calcolatore proseguì: «Gerver osservò che sebbene questo scenario sia plausibile, i calcoli necessari per dimostrare che esso funziona realmente diventano così imponenti da rendere impossibile il completamento della dimostrazione. In seguito, alla data astrale 1989, Gerver utilizzò un'idea avanzata da Scott W. Brown, allora all'Università dell'Indiana, per dimostrare che n corpi possono raggiungere l'infinito se n è abbastanza grande. La configurazione usata è una versione più simmetrica del triangolo di stelle ed è formata da un numero qualsiasi di stelle binarie, tutte della stessa massa.»

Il calcolatore visualizzò otto coppie di stelle, ognuna in orbita circolare intorno al proprio centro di massa. I centri occupavano i vertici di un ottagono regolare. Dei pianeti, in numero pari a quello delle stelle, si muovevano più o meno lungo i lati del poligono. I pianeti avevano tutti la stessa massa che era, però, molto inferiore a quella delle stelle. Ogni volta che un pianeta si avvicinava a una stella binaria, acquistava energia cinetica per effetto fionda. La stella binaria compensava con una perdita di energia cinetica e un restringimento dell'orbita. Il pianeta trasferiva anche quantità di moto alla stella binaria, costringendola a muoversi verso l'esterno allontanandosi dal centro del poligono. A causa della simmetria, tutte e otto le stelle binarie subivano esattamente e contemporaneamente lo stesso effetto.

Il calcolatore iniziò ad animare i corpi celesti. A ogni fase, il poligono cresceva, i pianeti si muovevano a velocità crescente e le stelle si avvicinavano lungo orbite sempre più strette.

Il signor Pock afferrò i comandi del calcolatore come un bambino vulgariano. «Wow! Fammi provare!» Iniziò a saltare su e giù sulla sedia, finché si accorse dello sguardo gelido del capitano. Con uno sforzo, si controllò.

«Capitano, sembra proprio che l'intero sistema fugga all'infinito dopo un numero infinito di effetti fionda, che si verificano sempre più rapidamente in un tempo finito» disse Pock. «Una simulazione al calcolatore, però, non è una prova. È necessario dimostrare che condizioni iniziali adeguate producano effettivamente la giusta successione di eventi.» Rimase un attimo pensieroso. «La simmetria dovrebbe svolgere un ruolo nella dimostrazione. In realtà riduce il problema da $3n$ corpi a 3. Una volta determinate posizione e velocità di una stella binaria e di un pianeta, la simmetria determina quelle degli altri corpi. In altre parole, il problema si riduce a uno relativo a tre corpi non collegati - ciascuno dei quali è un poligono regolare di punti massa - che si muovono sotto l'influsso di un insieme molto complesso di forze. Mi pare, comunque, un problema senza speranza» disse Pock.

«Se n è sufficientemente grande, si può trovare una dimostrazione in grado di soddisfare anche la più esigente delle logiche» fece notare il calcolatore. «In tal caso, le forze si semplificano.»

«Per tutte le galassie!» implorò Kink. «Quello che voglio sapere è: quanto deve essere grande n?»

«Gerver non riuscì a stabilire il valore esatto» rispose Pock.

«Maledizione!» sbraitò il capitano. «Non c'è nessuno che sia capace di darmi una risposta semplice?»

«Nel 1988, Zhihong (Jeff) Xia, allora alla Northwestern University, dimostrò che esiste un modo per far raggiungere a cinque corpi l'infinito in un tempo finito. Il suo scenario è diverso da quello di Gerver, ma anch'esso fa ricorso alla simmetria.»

«Ora ci siamo!» sospirò Kink. «Allora cinque punti massa sono sufficienti.»

«E quattro quasi certamente non lo sono» disse Pock. «Dato che gli Weelers usano sempre i mezzi ottimali per raggiungere i propri obiettivi, il proiettile doveva essere formato esattamente da cinque corpi.»

«Bene. Da qualche parte dobbiamo averle cinque bombe a newtroni. Ora dobbiamo capire quali intenzioni hanno gli Weelers. Perché ci hanno catturati in un Campo Newtoniano Ideale?»

«Capitano!» Yahoota volse lo sguardo preoccupata, mentre le sue dita continuavano ad armeggiare su una tastiera. «La *Overambitious* è spinta dal campo gravitazionale di un sistema complesso di stelle vicine. La nostra velocità è warp 1 in aumento. Capitano, sta crescendo geometricamente in intervalli di tempo geometricamente sempre più piccoli. Warp 2!... 4!... 8!... 16!»

Kink si voltò verso il pilota. «Signor Flakeoff, lanci le bombe a newtroni, prima che scompaiamo tutti nell'infi...»

BIBLIOGRAFIA

STEWART IAN, *The Problems of Mathematics*, Oxford University Press, 1987.

GERVER JOSEPH L., *The Existence of Pseudocollisions in the Plane*, Rutgers University, 1990.